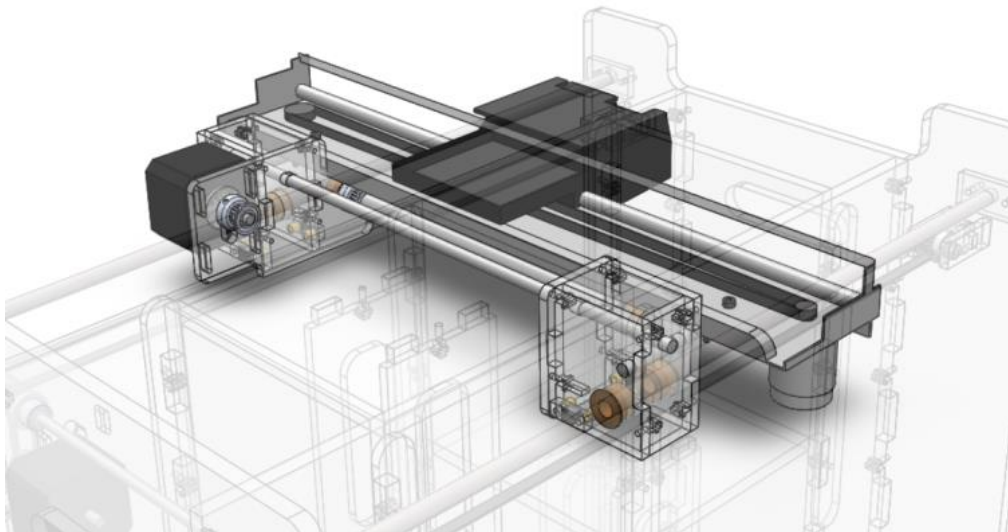


Verbeteren Open-Source 3D-printer

Bachelor Eindopdracht Industrieel Ontwerpen



VERBETEREN OPEN-SOURCE 3D-PRINTER
Bachelor Eindopdracht

AUTEUR
Luuk van Ewijk

DATUM
14-05-2014

BEGELEIDER
A. Budding

EXAMINATOR
M. B. De Rooij

UNIVERSITEIT TWENTE
Industrieel Ontwerpen

Voorwoord

De eerste regels van dit verslag formuleer ik op maandag ochtend, twintig over tien. Naarmate mijn collega's voor de komende tijd de studieruimte binnen komen druppelen neemt het geklik en getik om mij heen toe. Iedereen is druk aan het werk, of pretendeert druk aan het werk te zijn. Er wordt koffie gezet, maar ik hoor geen gepruttel en niemand drinkt daadwerkelijk koffie. Hopelijk is dit geen metafoor voor de overige activiteiten binnen deze ruimte.

Welnu, in deze omgeving ga ik aan de slag met mijn Bachelor Eindopdracht. Voor mij staat een deels transparant bouwwerk onder de noemer 'Open Source 3D-printer'. Er hangen draden aan, in alle kleuren van de regenboog. De wieltes en assen aan de bovenkant doen vermoeden dat er dingen gaan bewegen. Het grauw uitgeslagen plexiglas verraad het ontbreken van een belangrijk element: poeder. Met behulp van dit poeder, de wieltes en assen, de gekleurde draden en alle andere onderdelen waarvan mij de functie nog niet duidelijk is kan deze machine voorwerpen printen. Driedimensionale voorwerpen, die je kunt zien, vast houden, ruiken en proeven. Binnen mijn onderzoek zal de nadruk niet op de laatste twee liggen.

De focus van mijn onderzoek zal liggen op het verbeteren van de nauwkeurigheid waarmee deze transparante machine voorwerpen kan printen. Hiervoor zal ik mij eerst verdiepen in het technische functioneren ervan. Vervolgens ga ik kijken op welke punten de machine verbeterd kan worden. Uiteindelijk zullen één of meerdere verbeteringen doorgevoerd worden, waarna de gevolgen ervan getest kunnen worden. Uit de testresultaten kan ik daarna aflezen of de aanpassingen aan de machine de gewenste invloed op de nauwkeurigheid hebben.

Hoewel ik mij nooit eerder verdiept heb in de wonderenwereld van 3D-printers was mijn interesse na het zien van deze machine meteen gewekt. Ik kijk dan ook met plezier uit naar de komende periode, waarin ik me op mijn studieplek helemaal kan wijden aan dit magische apparaat. En misschien is deze werkomgeving helemaal zo gek nog niet: zojuist is er iemand naar het koffiezet apparaat gelopen en heeft dit in werking gesteld, waarna zij zelfs een kopje koffie ingeschonken heeft. Hoop gloort.

Samenvatting

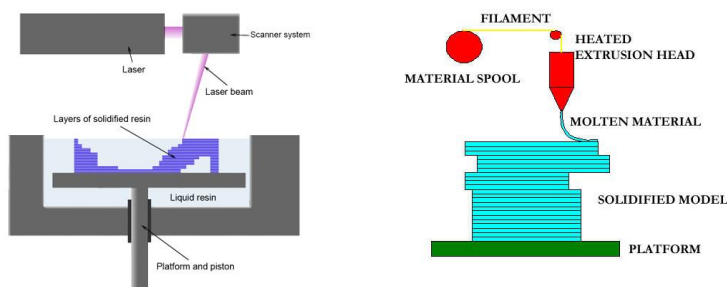
De focus van dit onderzoek ligt op het verbeteren van de nauwkeurigheid waarmee de 3D-printer Pwdr 0.1 voorwerpen kan printen. Om te begrijpen wat een 3D-printer is worden daarom eerst de belangrijkste kenmerken van 3D-printen in het algemeen benoemd. Vervolgens gaat het verslag dieper in op de kenmerken die betrekking hebben op de Pwdr 0.1 en wordt uitgelegd hoe de machine werkt.

Om verbeterpunten te vinden wordt eerst geanalyseerd welke onderdelen en functies van de Pwdr 0.1 een negatieve invloed op de nauwkeurigheid van printen hebben. Hieruit blijkt dat het type printkop van grote invloed is op de nauwkeurigheid, en er wordt gekozen om een alternatieve printkop over te zetten uit een inkjetprinter. De benodigde aanpassingen aan de machine worden doorgevoerd en er wordt een onderbouwde methode geformuleerd om de machine aan te sturen. De werking hiervan kan door tijdsgebrek en defecte elektronica niet getest worden.

Voorwoord	5
Samenvatting	7
1. Introductie.....	11
2. Powder-Based printen	12
3. Beschouwing Pwdr 0.1	13
4. Nauwkeurigheid printer	18
5. Keuze verbeterpunten	23
6. Introductie printkoppen in 3D-printen	27
7. Keuze aanpassingen	29
8. Doorvoeren aanpassingen	43
9. Conclusie	46
10. Verantwoording en achtergrond	47
Nawoord.....	51

1. Introductie

In de jaren '80 heeft de ontwikkeling van rapid prototyping een vlucht genomen. Rapid prototyping is een verzamelnaam voor processen die erop gericht zijn om relatief snel driedimensionale onderdelen te produceren met behulp van Computer Aided Design. Er zijn verschillende methodes om dit te doen. Bij de meeste vormen van Rapid prototyping worden modellen opgebouwd uit laagjes, doorsnedes van het model. Deze methodes zijn onder te verdelen in liquid-based, solid-based en powder-based printen. Bij liquid-based printen wordt vloeistof met behulp van Uv-licht omgezet in vaste stof. Dit gebeurt laag voor laag door een bad met vloeistof telkens een stukje te verhogen (zie figuur 1). Bij solid-based printen worden modellen opgebouwd uit lagen vaste stof. Dit kan bijvoorbeeld door verhitte vaste vloeistof op te spuiten of met een laser doorsnedes uit vaste stof te snijden. Bij powder-based printen worden lagen poeder met een bindmiddel, of door versmelting plaatselijk met de onderliggende lagen gebonden. Op deze laatste methode wordt in het volgende hoofdstuk uitgebreider ingegaan.



Figuur 1: voorbeeld van liquid-based printen en solid-based printen

In de afgelopen jaren is er een nieuwe ontwikkeling op gang gekomen binnen het 3D-printen. Waren het eerst alleen grote bedrijven die zich bezighielden met deze methode en hun technieken vastlegden in patenten, tegenwoordig worden 3D-printers steeds vaker door particulieren ontworpen en gebouwd. Doordat bevindingen over deze zelfgebouwde printers via het internet gedeeld worden gaan de ontwikkelingen, die eerder door de patenten en geheimhouding van grote bedrijven tegen werd gehouden, razendsnel.

Binnen deze nieuwe stroming is met verschillende methoden geëxperimenteerd. Powder-based printen is echter een methode die lange tijd onbelicht is gebleven. De Pwdr 0.1 is de eerste zelfgebouwde open-source 3D-printer die werkt op basis van deze methode. De machine is ontworpen om keramische membranen te printen door opeenvolgende lagen poeder plaatselijk met bindmiddel te binden.

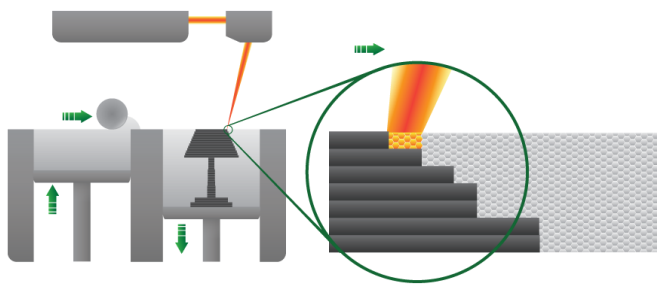
De Pwdr 0.1 is een grotendeels uitontwikkelde machine, maar met betrekking tot de nauwkeurigheid van printen kan er nog winst worden behaald. Het onderzoek dat in dit verslag beschreven wordt is erop gericht om deze nauwkeurigheid te vergroten, en de fysieke aanpassingen aan de machine die hiervoor eventueel nodig zijn door te voeren.

2. Powder-Based printen

Bij powder-based printen wordt een object opgebouwd uit opeenvolgende poederlagen. Een voordeel van deze methode is dat een product met uitsparingen in een keer geprint kan worden. Er zijn verschillende methodes om dit te doen. De meest gebruikte worden in dit hoofdstuk besproken.

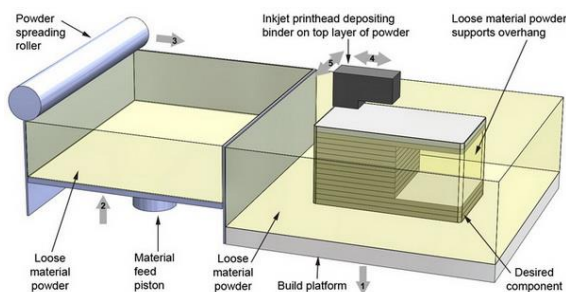
Bij Selective Laser Melting (SLM) (zie figuur 2) wordt elke poederlaag plaatselijk verhit waardoor het poeder smelt en na afkoeling vast wordt. De laag erboven zal door hetzelfde proces ook versmelten met de onderliggende laag, waardoor niet alleen doorsnedes van vaste stof ontstaan, maar de lagen ook aan elkaar gebonden worden. Het voordeel van SLS is dat het model in een keer geprint kan worden en nabewerking niet nodig is.

Selective Laser Sintering (SLS) lijkt op SLM maar verschilt hierin dat de lagen poeder niet plaatselijk gesmolten worden, maar alleen door versmelting aan elkaar gebonden worden.



Figuur 2: Selective Laser Melting/Sintering

Tenslotte is er Plaster-based 3D-Printing (PP) (zie figuur 3). Een methode waarbij plaatselijk bindmiddel op opeenvolgende lagen wordt geplaatst zodat de poederlagen aan elkaar gebonden worden. Een groot voordeel van PP is dat het zeer geschikt is voor experimenteren met verschillende soorten materiaal (poeder), korrelgroottes en types bindmiddel. Hierdoor kunnen met dezelfde methode uiteenlopende types producten gemaakt worden.



Figuur 3: Plaster-based 3D-Printing

3. Beschouwing Pwdr 0.1

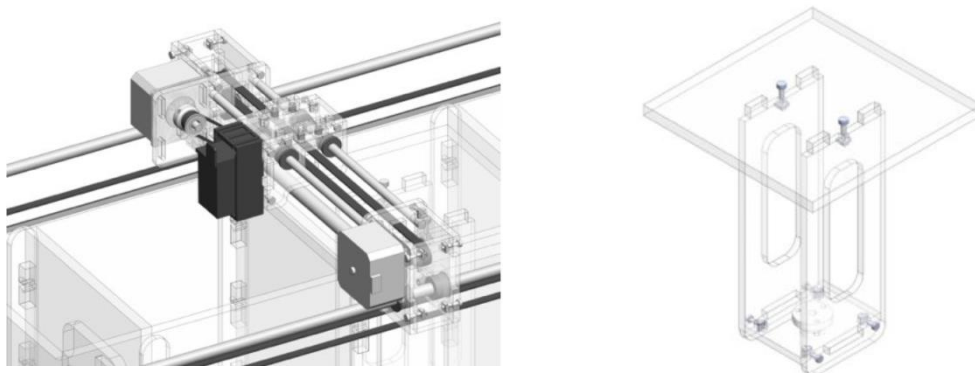
Om de rest van dit verslag te begrijpen is het van belang om eerst een duidelijk beeld van de werking van de Pwdr 0.1 te hebben. Hieronder worden daarom de belangrijkste onderdelen en functies, en de relatie die zij met elkaar hebben, op een rijtje gezet.

3.1 *Gebruik*

Alvorens er geprint kan worden dient een te printen voorwerp gemodelleerd te worden in een 3D modelleerprogramma op de computer (bijvoorbeeld Solid Works). Vervolgens kan dit model in de software die voor de Pwdr 0.1 ontwikkeld is opgedeeld worden in laagjes. Deze software, geschreven in Processing (een uitbreiding van Java, en dus open-source software), biedt een grafische gebruikersinterface (GUI) waarmee de machine bediend kan worden. Dat wil zeggen dat de gebruiker opdrachten naar de machine kan versturen vanuit een venster op de computer. Nadat het 3D-model opgedeeld is in laagjes, wordt een map waarin voor elk laagje een bestand is aangemaakt, overgezet op een SD-kaart die aangesloten is op de computer. Vervolgens wordt deze SD-kaart aangesloten worden op de *microcontroller*. De microcontroller vormt de verbinding tussen de computer en de machine en is via een USB-verbinding aangesloten op de PC. De microcontroller staat op zijn plaats via elektrische bedrading in contact met de verschillende aan te sturen onderdelen van de machine. Als er genoeg poeder in de *constructiebak* (zie volgende paragraaf) aanwezig is en de printkop genoeg bindmiddel bevat kan er nu een printopdracht gestart worden vanuit de gebruikers interface.

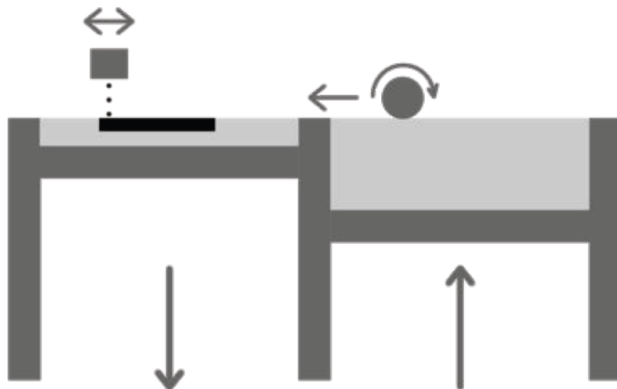
3.2 *Mechanische werking*

Aan de bovenkant van de machine zijn assen bevestigd, waartussen een *roller* en een *printkop* in x en y richting kunnen bewegen. Dit geheel vormt samen het *positionerings mechanisme* en wordt aangedreven door stappen motoren. Een stappen motor voor de X-richting (assen waarover alleen printkop beweegt) en een stappen motor voor de Y-richting (assen waarover gehele XY-drager beweegt).



Figuur 4-5: XY-drager(rechts) en voorraadbak (links)

Met behulp van de roller wordt er poeder vanuit een voorraadbak met poeder naar een tweede bak, de *constructiebak*, verplaatst. Dit nadat de voorraadbak een stapje omhoog is gegaan en de constructiebak een stapje omlaag. Beide bakken worden aangedreven door stappen motoren die de *zuigers*, plateaus onderin de bakken, omhoog en omlaag bewegen. De roller beweegt hierbij in Y-richting, en roteert daarbij met de klok mee zoals aangegeven in figuur 6.



Figuur 6: verplaatsing poeder en plaatsen van bindmiddel

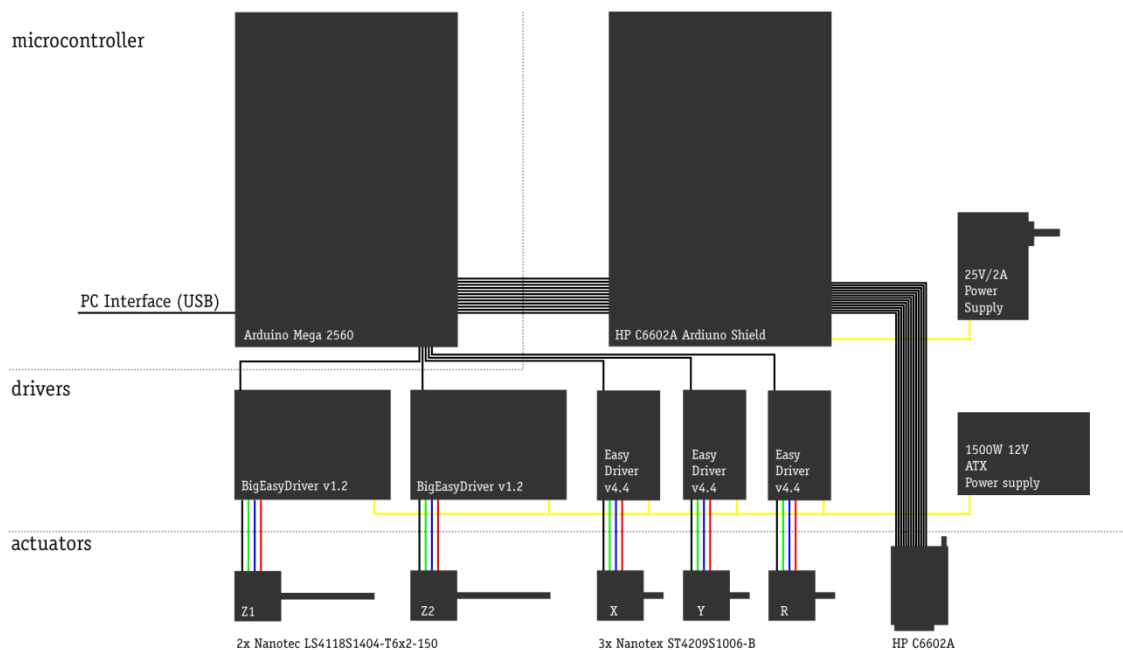
Op het laagje poeder dat zich vervolgens in de constructiebak bevindt, worden door de *printkop* druppeltjes *bindmiddel* gelost. Dit bindmiddel bestaat uit een combinatie van water en ethanol. De coördinaten waarop het bindmiddel terecht moet komen worden vertaald in aantallen stappen en aan de stappen motoren doorgegeven vanuit de microcontroller, waaraan de SD-kaart is bevestigd. Als het bindmiddel is geplaatst wordt er met behulp van de roller een nieuwe laag poeder vanuit de voorraadbak overgebracht naar de constructiebak. De nieuwe laag poeder zal op de plekken waar zich bindmiddel bevindt hechten aan de poederlaag eronder. Het proces begint nu weer opnieuw vanaf het lossen van het bindmiddel.

3.3 Elektronica

Op de volgende pagina is een schematische weergave van alle elektronica in de Pwdr 0.1 te zien (figuur 7). Aan de hand van dit schema zal de functie van elk onderdeel, en de manier waarop zij met elkaar interacteren besproken worden.

Vanuit de microcontroller (Arduino Mega 2560) gaan twaalf uitgangen naar het protoshield (Arduino Mega). Vanuit het protoshield, dat door een 25V power supply wordt gevoed, gaan twaalf uitgangen naar de inkjet cartridge. De microcontroller geeft korte stroomstootjes van 5V, die in het protoshield versterkt worden tot 12V en uiteindelijk de inkjet cartridge op dit voltage bereiken. Deze stroomstootjes zorgen ervoor dat de druppeltjes inkt in de cartridge gelost worden.

Vanuit de microcontroller gaan ook twee keer vijf uitgangen naar de Easydrivers, die de vijf stappen motoren die de voorraad- en constructiebak en de XY-drager ondersteunen. De functie van de Easydrivers is echter slechts het uitvoeren van de opdrachten die de microcontroller verstuurt. Deze opdrachten bestaan uit het aantal stappen dat de betreffende stappen motor moet nemen, en de richting waarin hij moet bewegen. Voor de stappen motoren die de XY-drager en de roller aandrijven (Nanotec stappen motors) zijn normale Easydrivers gebruikt die tot 750mA per fase van een bipolaire stappen motor ondersteunen. Voor de stappen motoren die de voorraad- en constructiebak aandrijven (Nanotec linear position drive) worden Big Easydrivers gebruikt die tot 2A per fase ondersteunen. De Easydrivers en Big Easydrivers worden gevoed door een 12V power supply en hebben elk vier uitgangen die naar de bijbehorende stappen motor leiden.



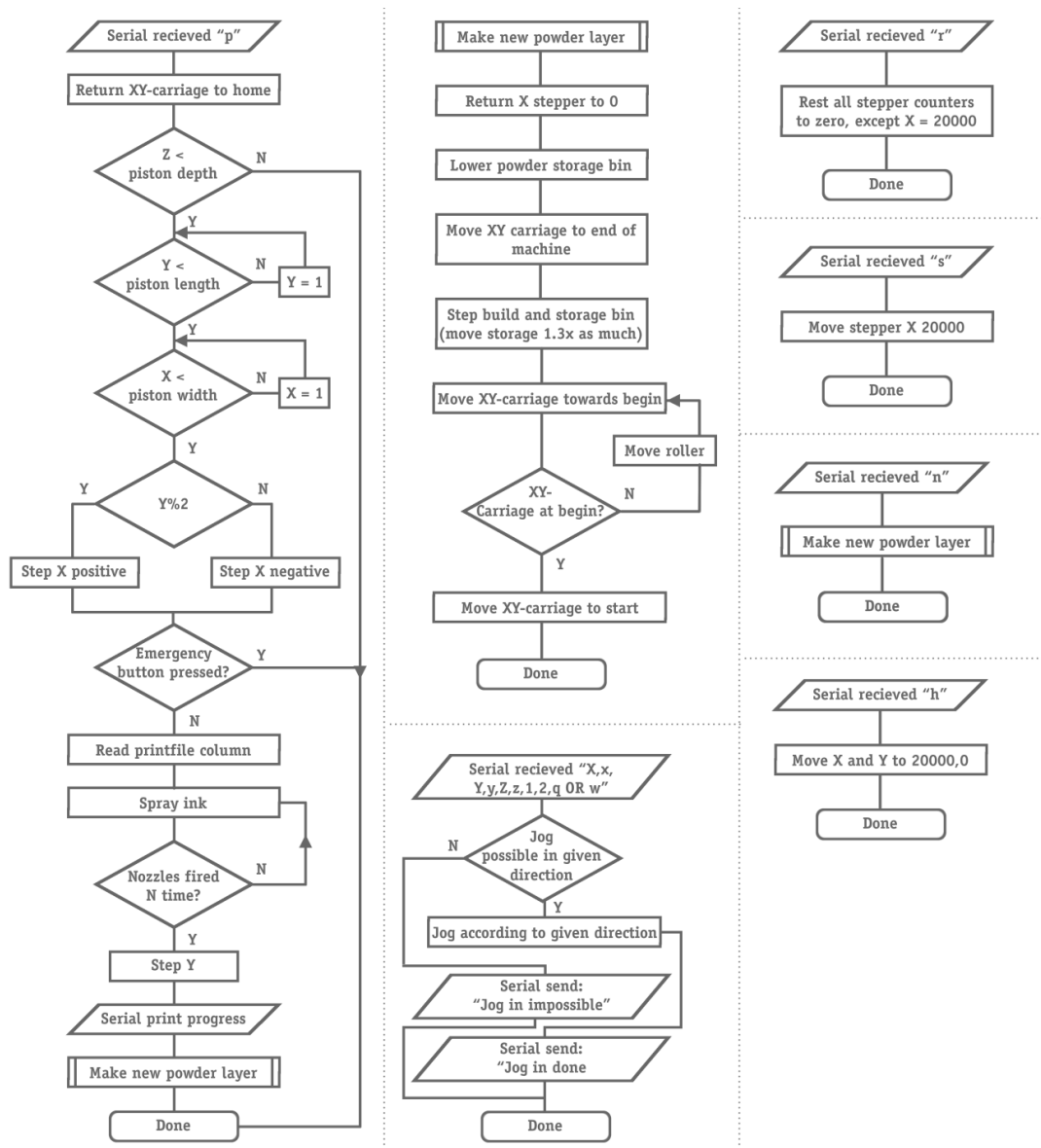
Figuur 7: schematische weergave elektronica

3.4 Software

De software waarmee de Pwdr 0.1 aangestuurd wordt bestaat uit twee delen: de firmware, die door de microcontroller uitgevoerd wordt, en de client software die op de pc uitgevoerd wordt. Deze twee communiceren doormiddel van een usb-kabel die tevens de microcontroller van stroom voorziet.

3.4.1 Firmware

In figuur 8 is een flowchart van de huidige firmware te zien, waarin met pijlen de interactie tussen de verschillende acties is weergegeven. De letters P, N, X en Y staan respectievelijk voor printen, nieuwe laag poeder aanbrengen en het bewegen in X- en Y-richting. In het bestand *PwdrFirmware2_0* is alle onderstaande informatie gedefinieerd. In deze code kunnen dus ook de verschillende parameters, zoals stapgrootte en rotatiesnelheid van stappen motoren bepaald worden. Er zal dieper ingegaan worden op de werking van de firmware als het nodig is deze aan te passen.



Figuur 8: schematische weergave van firmware

3.4.2 Client software

De client software is zoals eerder vermeld geschreven in Processing en bestaat uit een aantal afzonderlijke delen. In *Pwdr_GUI_VO_3.pde* (extensie.pde geldt voor bestanden die in Processing gelezen worden) wordt het uiterlijk van het aansturingsprogramma op de computer gedefinieerd, ook wel gebruikers interface genoemd. In deze code zijn bijvoorbeeld afmeting, kleur en tekst van de gebruikers interface terug te vinden en aan te passen. Daarnaast zijn alle handelingen gedefinieerd die vanuit de gebruikers interface uitgevoerd kunnen worden. Specifieke handelingen worden slechts aangeroepen in de code voor de gebruikers interface, en in andere codes gedefinieerd. De laatstgenoemde codes zijn ondergebracht in een aantal verschillende bestanden. Zo staan in het bestand *convertModel* de codes die ervoor zorgen dat het CAD-model geconverteerd wordt naar losse bestanden van (coderingen voor) doorsneden.

4. Nauwkeurigheid printer

4.1 *Beschouwing*

Alvorens te kunnen focussen op het verbeteren van de printer moeten de huidige prestaties vastgesteld worden, in het bijzonder de nauwkeurigheid van de machine. Hierbij wordt gekeken naar elk onderdeel van de machine dat invloed kan hebben op de nauwkeurigheid, en eventueel aangepast of vervangen moet worden. In dit hoofdstuk worden alle onderdelen (en hun functies) die getest kunnen worden nagegaan. In het volgende hoofdstuk wordt gekeken welke informatie al beschikbaar is en wat er nog gemeten kan worden.

3.4.1 *Positioneringsmechanisme*

Om te beginnen wordt de nauwkeurigheid van het positioneringsmechanisme van de machine geanalyseerd. Aangezien de printkop en de zuigers aangestuurd wordt door stappen motoren kan naar aanleiding hiervan een uitspraak gedaan worden over de nauwkeurigheid van deze motoren.

- Nauwkeurigheid beweging over de x-as
- Nauwkeurigheid beweging over de y-as
- Nauwkeurigheid beweging zuiger voorraadbak
- Nauwkeurigheid beweging zuiger constructiebak

4.1.2 *Roller*

Vervolgens wordt de wijze waarop de poederlaag in de constructie bak tot stand komt bekeken. Het poeder wordt met een roller van de voorraadbak naar de constructiebak geschoven (horizontale beweging) terwijl deze zelf roteert. Om erachter te komen welke invloed dit proces heeft op de printnauwkeurigheid moeten de onderstaande deelprocessen beschouwd worden.

- Rotatiesnelheid roller
- Horizontale snelheid roller
- Radius roller
- Plaatsing roller t.o.v. aandrijving
- Invloed bovenstaande eigenschappen op structuur van poeder (met name dichtheid)

4.1.3 *Poederlaag*

Daarnaast zijn de eigenschappen van de poederlaag zelf van belang. De volgende grootheden hebben invloed op de structuur van het eindproduct.

- Type poeder
- Dikte poederlaag
- Dichtheid poederlaag
- Korrelgrootte poeder

4.1.4 *Printkop en bindmiddel*

Tenslotte wordt er naar de printkop gekeken. Met betrekking tot de nauwkeurigheid van printen zijn de onderstaande eigenschappen van invloed.

- Resolutie printkop
- Druppelgrootte bindmiddel
- Samenstelling bindmiddel
- Plaatsing printkop

4.1.5 *Relatie bindmiddel met poeder*

De wijze waarop het bindmiddel uit de printkop reageert met de te gebruiken soort poeder is essentieel voor de structuur van het eindproduct. Daarom is het belangrijk om te kijken naar deze eigenschappen.

- Mate van penetratie bindmiddel bij gegeven eigenschappen van poeder
- Mate spreiding bindmiddel bij gegeven eigenschappen van poeder

4.2 *Literatuur onderzoek*

Om te voorkomen dat tijdens dit onderzoek testen worden gedaan en conclusies worden getrokken die bij de totstandkoming van de machine al vastgelegd waren, moet alvorens te beginnen met testen literatuuronderzoek gedaan worden. Hierbij is het afstudeerverslag over de Pwdr 0.1 de hoofdzakelijke bron. Per hierboven vastgesteld te testen onderdeel wordt in deze paragraaf de beschikbare informatie vastgesteld.

4.2.1 *Positioneringsmechanismen*

In de firmware van de machine is af te lezen dat de stappen motoren met een minimale stapresolutie van ongeveer 0,09mm bewegen. De werkelijke stapgrootte is 0,265 millimeter (gebaseerd op de resolutie van de printkop). Metingen naar de nauwkeurigheid van deze stappen motoren zijn uitgevoerd met een micrometer met een precisie van 0,003mm en een resolutie van 0,001mm. Alle metingen zijn vijfvoudig uitgevoerd. Uit deze metingen is gebleken dat voor beweging over de x-as een onnauwkeurigheid van 1% en voor de beweging over de y-as een onnauwkeurigheid van 3% gold. Voor de beweging van de zuiger van de voorraadbak gold een onnauwkeurigheid van 3% en voor de beweging van de zuiger van de constructiebak gold een onnauwkeurigheid van 4%. Hierbij wordt opgemerkt dat de onnauwkeurigheid van de zuigers mede te wijten is aan frictie tussen de wanden van de bakken en de zuiger.

4.2.2 *Roller*

De rotatie snelheid van de roller, die aangedreven wordt door een stappen motor kan variëren tussen de 60 en 120 rotaties per minuut. De maximale horizontale snelheid van de roller is 84mm/s. De radius van de roller is 5mm. Het ontwerp biedt echter de mogelijkheid een roller met een grotere radius in te bouwen, tot een radius van 15mm. De roller is in het middelpunt van de aandrijving geplaatst om zo min mogelijk speling toe te staan. De afstand tot de printkop houder is 20mm. Over de invloed van die hiervoor genoemde eigenschappen van de roller op de structuur van de poederlaag is weinig bekend. Het is slechts empirisch bepaald dat de huidige eigenschappen van de roller een geprint product opleveren dat een dichtheid heeft, voldoende om in tact te blijven voor verhitting.

4.2.3 *Poederlaag*

De huidige machine werkt met poeder dat geschikt is om keramische membranen mee te maken. De korrelgrootte van het poeder ligt rond de 47 micron, maximaal 100 micron. De dikte van de poederlaag ligt rond de 100 micron.

4.2.4 *Printkop en bindmiddel*

De huidige printkop is een inkjet cartridge die print met een resolutie van 96 dpi. De druppelradius van het bindmiddel is 44 micron. De samenstelling van het bindmiddel is een combinatie van water en ethanol in de verhouding 80:20. De afstand tussen de printkop en het printoppervlak ligt tussen de 4mm en 6mm.

4.2.5 *Relatie bindmiddel met poeder*

Voor het printen op een laag ongebonden poeder van 100 micron is bij een druppelradius van 44 micron (van het bindmiddel water-ethanol 80:20) een model opgesteld. Hieruit blijkt dat voor het penetreren van deze poederlaag een druppelradius van tussen de 52µm en 90µm vereist is. Dit ten gevolge van het feit dat de penetratie en spreiding tussen de 1,1 en 1,9 keer groter zijn dan de druppelradius. Dit heeft tot gevolg dat bij een druppelradius van 44 micron twaalf druppels nodig zijn om de poederlaag te penetreren.

4.3 Metingen

Op basis van het literatuuronderzoek wordt beslist of, en zo ja, welke onderdelen van de machine getest gaan worden. Per onderdeel zal hieronder de keuze om wel, dan wel niet testen uit te voeren onderbouwd worden.

4.3.1 Positioneringsmechanismen

De positioneringsmechanismen zijn volgens het afstudeerverslag met een micrometer vijfmaal getest. De resultaten van deze testen zijn betrouwbaar en veronderstellen een realistische onnauwkeurigheid. Daarom krijgt het doen van nieuwe metingen naar de nauwkeurigheid van de positioneringsmechanismen binnen deze opdracht geen prioriteit.

4.3.2 Roller

Gegevens over de eigenschappen van de roller zijn allemaal bekend. De effecten van de eigenschappen van de roller op de poederlaag zijn echter extreem moeilijk meetbaar. Doordat de eigenschappen van de poederlaag, na aandrukken, niet getest kunnen worden zonder de laag zelf hierbij te beschadigen is het moeilijk om er uitspraken over te doen. Daarnaast vereist het variëren van de omstandigheden bij zo'n onderzoek drastische aanpassingen aan de machine. Denk bijvoorbeeld aan de plaatsing van de roller en het testen van roller diameters die nog niet getest zijn voor het eindmodel. In overleg met de begeleider is daarom gekozen om naar de invloeden van de roller op de nauwkeurigheid geen extra metingen uit te voeren.

4.3.3 Poederlaag

De gegevens over de poederlaag zijn duidelijk en er hoeven daarom geen extra gegevens gezocht te worden.

4.3.4 Printkop en bindmiddel

Alle gegevens over de printkop zelf zijn bekend. Op basis van deze gegevens kan later beslist worden of verbetering van dit onderdeel significant aan de nauwkeurigheid van printen bijdraagt.

4.3.5 Relatie bindmiddel met poeder

Bij een gegeven korrelgrootte van het poeder zijn de penetratie en spreiding van het bindmiddel gemeten. Deze metingen geven een helder en betrouwbaar beeld van de onnauwkeurigheid van dit onderdeel, hoewel het analytisch bewijs onbruikbaar verklaard is. Metingen met betrekking tot de relatie van het bindmiddel met het poeder hoeven dus niet uitgevoerd te worden.

4.3.6 Plaatsing printkop

De gegevens over de plaatsing van de printkop zijn niet duidelijk gedefinieerd in het afstudeerverslag. Om erachter te komen hoe groot de afstand tussen de printkop en de

poederlaag is moet een meting uitgevoerd worden.

4.4 *Metingen uitvoeren*

In de vorige paragraaf is vastgelegd dat de afstand tussen de printkop en het printoppervlak gemeten moet worden. Deze meting voer ik uit met behulp van een schuifmaat. Na meting bleek de afstand tussen de printkop en het printoppervlak 4mm te bedragen.

4.5 *Conclusie*

In dit hoofdstuk is gekeken naar de nauwkeurigheid van de huidige printer, de Pwdr Model 0.1. Eerst is bepaald welke aspecten van de printer invloed hebben op de nauwkeurigheid waarmee producten geprint worden. Dit waren de positioneringsmechanismen, de roller, de poederlaag, de printkop met bindmiddel, de relatie tussen het bindmiddel en het poeder, en de plaatsing van de printkop. Hierover waren bijna alle gemeten waarden en gegevens bekend. Alleen over de effecten van de eigenschappen van de roller op de poederlaag, en de afstand van de printkop tot het printoppervlak zijn weinig gegevens bekend. De omvang van deze opdracht in oogschouw nemend is besloten geen extra metingen naar de effecten van de eigenschappen van de roller op de poederlaag te doen. De afstand van de printkop tot het printoppervlak is wel gemeten.

5. Keuze verbeterpunten

Nu de nauwkeurigheid en andere gegevens over de verschillende onderdelen van de machine grotendeels bekend zijn, kan bekeken worden op welke punten de machine verbeterd kan worden. Verbeteringen aan de machine dienen de nauwkeurigheid waarmee het eindproduct geprint wordt te vergroten, waardoor een model ontstaat dat zoveel mogelijk het CAD-model gelijkt.

5.1 Overzicht

In de onderstaande tabel is het keuzeproces schematisch weergegeven. Na elk aanpasbaar onderdeel in beschouwing te hebben genomen (zie onderbouwing in overige paragrafen van dit hoofdstuk) zijn plussen en minnen toegekend per criterium waarop beoordeeld is. Aangezien het zeer moeilijk is om precieze waarderingen te geven in deze fase van het onderzoek heb ik gekozen voor een beoordelingssysteem dat de relatieve verschillen ten opzichte van elkaar weergeeft. Hierbij moet de kanttekening gemaakt worden dat het criterium *significantie* veruit het belangrijkste is. Als het aan te passen onderdeel hierin laag heeft gescoord kan dit niet door de overige criteria gecompenseerd worden.

Aanpasbaar Onderdeel	Tijd (veel- weinig)	Kosten (hoog- laag)	Significantie (klein-groot)	Haalbaarheid (laag-hoog)	Totaal
Positionerings- Mechanismen	- -	- -	-	- -	-7
Roller	+/-	+	- -	+	0
Poederlaag	-	++	+/-	-	0
Printkop/plaatsing	+/-	-	++	+	+1
Bindmiddel	++	++	-	++	+5

5.1.1 Positioneringsmechanismen

De onnauwkeurigheden van de positioneringsmechanismen variëren tussen 1% en 4%. Kleine, maar significante onnauwkeurigheden die worden veroorzaakt door de stijfheid van het positioneringsmechanisme, de wrijving tussen de assen en binnenwanden en de bewegende delen en de wrijving in de aandrijving. Het gaat hierbij om de negatieve invloed van factoren die met zeer kleine, maar moeilijk uitvoerbare aanpassingen verkleind zou kunnen worden. Zo zou de frictie tussen de zuigers en de binnenwanden van de bakken verholpen kunnen worden door precies schuurwerk aan de zuigers. Wordt er echter iets teveel materiaal van de zuigers afgeschuurd, dan bestaat de kans dat het

poeder dat erop komt te liggen door kieren ontsnapt. Daarbij ontstaat frictie niet alleen door de bouw van de machine, maar ook doordat het poeder tegen de binnenwanden aan zit. Dit is een factor waarvan de invloed moeilijk te meten is aangezien deze kan verschillen per keer dat er poeder in de machine wordt gedaan. De stijfheid van het positioneringsmechanisme is eveneens moeilijk te verbeteren. Een aanzienlijk deel van de machine zou qua constructie aangepast moeten worden (of in ieder geval getest) om erachter te komen of andere constructiewijzen de stijfheid vergroten. De wrijving tussen de aandrijfriem en de overige onderdelen van de aandrijving kan gedeeltelijk verholpen worden door te kijken naar de invloed van de aandrijfriem en de onderhoudsstaat van de draaiende onderdelen. Deze zouden eventueel aangepast of vervangen kunnen worden.

5.1.2 Roller

Eventuele aanpassingen met betrekking tot de roller zijn, zoals eerder genoemd, de rollerdiameter, de rotatiesnelheid en de horizontale snelheid. Zoals in §1.3.2 wordt toegelicht zijn metingen naar de invloed van de roller op de nauwkeurigheid, gevolgd door eventuele aanpassingen echter moeilijk haalbaar.

5.1.3 Poederlaag

Om een gladde poederlaag te verkrijgen is een korrelgrootte tussen de 40 micron en 100 micron nodig. Het poeder waarmee de machine getest is had een korrelgrootte van 47 micron. Een korrelgrootte die vergelijkbaar is met de korrelgrootte van het poeder dat uiteindelijk gebruikt is om keramische membranen mee te maken. Het aanpassen van de eigenschappen van het poeder kan invloed hebben op de nauwkeurigheid van printen. Aangezien echter rekening gehouden moet worden met de eigenschappen van het materiaal waarmee het keramisch membraan gemaakt dient te worden, is dit een breder onderzoek dan het aanvankelijk lijkt.

5.1.4 Printkop en bindmiddel

Het vervangen van de huidige printkop kan leiden tot nauwkeurigere printresultaten. Zo kan de druppelradius invloed hebben op de nauwkeurigheid, aangezien een grotere druppelradius tot gevolg heeft dat er minder druppels op een plek te hoeven worden geplaatst. Een kleinere druppelradius biedt de mogelijkheid tot printen in hogere resolutie en zou ook een verbetering op kunnen leveren. Daarnaast heeft een nieuwere printkop het voordeel dat deze waarschijnlijk nauwkeuriger druppels plaatst dan de huidige. Tenslotte kan de samenstelling van het bindmiddel invloed hebben op de nauwkeurigheid. Om hier achter te komen moet de verhouding tussen alcohol en water gevarieerd worden.

5.1.5 Relatie bindmiddel met poeder

In §1.2.5 is aangegeven dat door de druppelradius van de huidige printkop 12 druppels nodig zijn om op een punt het poeder te penetreren. Het lossen van een groot aantal druppels zorgt voor een onnauwkeurige spreiding van bindmiddel, wat niet ten goede komt aan de nauwkeurigheid van printen. Het aanpassen van de druppelradius zal de relatie van het bindmiddel met het poeder, zoals eerder aangegeven, waarschijnlijk

positief beïnvloeden.

5.1.6 Plaatsing printkop

De weg die de geloste druppel aflegt heeft invloed op de snelheid waarmee hij het poederoppervlak bereikt. Dit heeft op zijn plaats weer invloed op de spreiding en daarmee de nauwkeurigheid van plaatsing van de druppel. Het variëren van de afstand van de printkop tot het printoppervlak kan dus een nauwkeuriger printresultaat opleveren.

5.2 Keuze

Na beschouwing van de mogelijkheden om de nauwkeurigheid van de printer te vergroten kan een onderbouwde keuze gemaakt worden met betrekking tot de onderdelen die aangepast zullen worden. In hoofdstuk 1 is al aangegeven dat het aanpassen van de eigenschappen van de roller en de poederlaag én teveel omvattend is voor deze opdracht, én zeer moeilijk te meten resultaten op zal leveren. Daarbij kunnen nu al concrete positieve effecten door aanpassingen aan de printkop en het bindmiddel worden benoemd. Het is dus logischer om te focussen op de laatste. Ook omdat het aanpassen van de printkop en zijn houder een relatief beperkte ingreep is in het design van de huidige machine. Het is een losstaand onderdeel dat apart gebouwd kan worden, zonder dat ander onderdelen van de machine aangepast hoeven te worden. Dit in tegenstelling tot aanpassingen aan het positioneringsmechanisme. Zoals aangegeven zouden zulke aanpassingen grote effecten hebben op de overige onderdelen van de machine, waardoor kleine verbetering zeer veel tijd en moeite kosten. Daarbij ingecalculeerd dat het positioneringsmechanisme al een relatief kleine onnauwkeurigheid vertoont vormt dit genoeg reden om te gaan focussen op de printkop, het bindmiddel en de drager waarin de printkop is verwerkt.

5.3 Conclusie

In dit hoofdstuk is gekeken naar de mogelijke manieren om de nauwkeurigheid van de printer te verbeteren. Tijdens de beschouwing van de verschillende onderdelen van de machine is vastgesteld dat het aanpassen van eigenschappen van het positioneringsmechanisme en zijn aandrijving mogelijk is, maar geen grote invloed zal hebben op de nauwkeurigheid en daarbij zeer ingrijpend zal zijn voor het design van de gehele machine. Aanpassingen aan de roller zijn eveneens ingrijpend voor het design en hebben waarschijnlijk weinig invloed op de nauwkeurigheid. Het variëren en de eigenschappen van de poederlaag levert zeer moeilijk meetbare resultaten op, en gegeven dat het eindproduct een structuur dient te hebben die geschikt is voor keramisch membraan zijn de mogelijkheden tot variëren beperkt. Aanpassingen aan de printkop, de houder (met betrekking tot plaatsing van printkop t.o.v. van printoppervlak) en het bindmiddel zijn relatief makkelijk uitvoerbaar. Daarbij kunnen op voorhand concrete positieve effecten door aanpassingen aan de printkop en het bindmiddel worden

benoemd. Vanaf nu zal het onderzoek zich daarom richten op de eigenschappen van de printkop, de relatie ervan t.o.v. de rest van de machine en de samenstelling van het bindmiddel.

6. Introductie printkoppen in 3D-printen

Zoals eerder vermeld werkt de Pwdr 0.1 met een inkjet cartridge die print met een resolutie van 96 dpi. Om een idee te krijgen van de mogelijkheden op het gebied van printkoppen in 3D-printen wordt in dit hoofdstuk dieper ingegaan op de werking van een inkjet printkop.

De inkjetprinter is het meest gebruikte type computer printer. De printkop, die aangestuurd wordt door een computer, vormt een digitale afbeelding door kleine druppeltjes inkt op een ondergrond (meestal papier) te plaatsen. De inkjet printtechniek is ontstaan in de jaren '50 en wordt sindsdien hoofdzakelijk door Canon, HP, Epson en Lexmark op de markt gebracht.

Binnen de inkjet printtechniek is een onderscheid te maken tussen twee concepten: Piëzo-inkjetprinten en Thermisch inkjetprinten. Printers die met de Piëzo-techniek werken hebben een vaste printkop. Een door een elektrische puls veroorzaakt vervorming van het Piëzo-element zorgt voor een schokgolf in het inktkanaal, waarop er een druppel inkt gelost wordt. Thermische inkjetprinters werken met een vervangbare printkop die deel uitmaakt van een inktpatroon, of inktcartridge. Door een elektrische puls op een verwarmingselementje in het inktkanaal te zetten vormt zich een dampbelletje, dat een schokgolf opwekt nadat het geïmplodeerd is. Deze schokgolf zorgt ervoor dat er een druppel inkt gelost wordt.

De printkop die voor de Pwdr 0.1 gebruikt wordt werkt volgens dit laatste principe. Het is een goedkopere, maar langzamere optie dan de Piëzo-techniek. Dit komt doordat het verwarmingselementje nadat er een elektrische puls op gezet is telkens even af moet koelen. Aangezien printsnelheid voor 3D-printen echter veel minder relevant is dan voor printen op papier is dit geen groot nadeel.

De eigenschappen van een printkop die belangrijk zijn voor de toepassing 3D-printen zijn de resolutie, en de druppelradius van de inkt die hiermee samengaat. De minimale stapgrootte van een inkjet printer is vastgesteld op basis van de maximale resolutie van de printkop. Aangezien een printkop in een 3D-printer door zijn eigen aandrijving voortbewogen zal worden kan de stapgrootte vrij bepaald worden. Afhankelijk van de minimale stapgrootte van de stappen motoren waarmee de Pwdr 0.1 wordt aangedreven kan de minimale druppelradius berekend worden (hierbij rekening houdend met het aantal druppels dat nodig is om te penetreren, en daarmee de uitvloeiradius). Hieruit volgt de maximaal haalbare resolutie voor de 3D-printer.

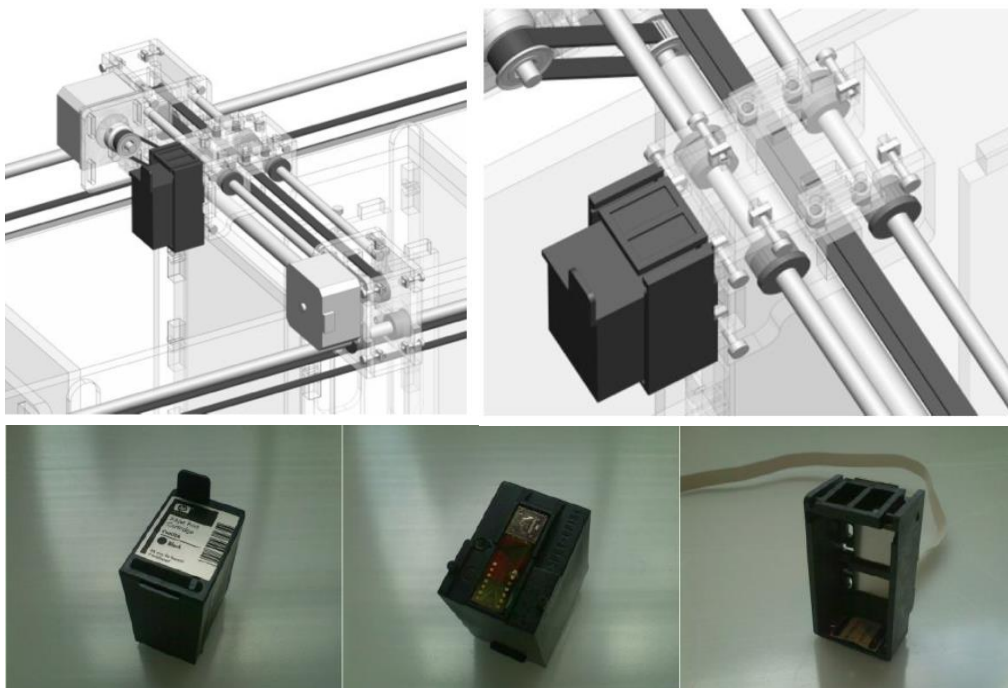
Aangenomen dat de stapgrootte oneindig verkleind kan worden (wat niet zo is) zou je nu kunnen stellen dat er voor nauwkeurigere printresultaten gezocht moet worden naar een printkop die met een maximale resolutie kan printen en dus werkt met druppels met een minimale radius. Er speelt echter nog een tweede aspect mee: de deeltjesgrootte van het

poeder. Als de druppelradius kleiner is dan de radius van de deeltjes zal het bindmiddel niet meer in staat zijn de poederdeeltjes goed aan elkaar te binden. Dit zou opgelost kunnen worden door meerder druppels op dezelfde plek te lossen. Op zijn plaats kan dit echter weer onnauwkeurigheid opleveren in het printresultaat.

In de volgende fase van het onderzoek kijk ik aan welke precieze eisen de nieuwe printkop moet voldoen met als doel een geschikte vervanging voor de huidige printkop te vinden.

7. Keuze aanpassingen

In deze fase van het onderzoek wordt een geschikte vervanging voor de huidige printkop gezocht en een aanpak opgesteld voor het integreren van deze printkop in de 3D-printer. Om tot een goede keuze te komen moet eerst gekeken worden aan welke precieze eisen de printkop moet voldoen. Vervolgens wordt gekeken op welke wijze deze printkop verkregen kan worden en welke onderdelen van de 3D-printer die in contact staan met de huidige printkop vervangen of aangepast moeten worden. In figuur 9 zijn afbeeldingen te zien van de huidige printkop, en de draagconstructie waarin deze gemonteerd is.



Figuur 9: de huidige printkop, een HP C6602A

7.1 Gewenste specificaties

Er is een aantal redenen om de huidige printkop te vervangen. In het algemeen kan gesteld worden dat de nauwkeurigheid van printen toe kan nemen wanneer het juiste alternatief gekozen wordt. Deze nauwkeurigheid is afhankelijk van de volgende factoren:

- De druppeldiameter, die volgt uit de resolutie van de printkop
- Het aantal te deponeren druppels en de uitvloeidiameter die hieruit volgt
- De stapgrootte van de aandrijving, die volgt uit de uitvloeidiameter
- De nauwkeurigheid van plaatsing van de druppels

De huidige printkop heeft een resolutie van 96 dpi en een druppel diameter van 88 micron. Er zijn twee opties met betrekking tot de druppel diameter die verbetering van het printresultaat op kunnen leveren: een grotere druppel diameter, zodat er minder druppels per coördinaat gelost hoeven te worden en de uitvloeiradius dus kleiner wordt; een kleinere druppel diameter, zodat in hogere resolutie geprint kan worden. Deze tweede optie heeft het nadeel dat er meer druppels per coördinaat nodig zullen zijn dan wanneer een grotere druppel wordt gebruikt (door lager penetratievermogen). Dit kan onnauwkeurigheden opleveren door onvoorspelbaarheid van het uitvloeiproces. Voordelen zijn echter dat er geprint kan worden op een hogere resolutie en dat de uitvloeiradius (ook al is deze relatief gezien groter) kleiner is dan bij de eerste optie (de geloste druppel zelf is immers kleiner). Het ligt dus voor de hand om een printkop die kan printen op hogere resolutie, en dus een kleinere druppel diameter heeft, te kiezen.

Hoewel de keuze voor een kleinere druppel diameter voor de hand ligt moet daarbij wel met een ander aspect rekening gehouden worden: de korrelgrootte van het poeder. Als de druppel diameter de diameter van de korrels benaderd, of zelfs kleiner is, kan dit invloed hebben op het vermogen om te binden. Het kan dus nadelig zijn om een printkop met een druppel diameter te kiezen die kleiner is dan de huidige, maar niet kleiner dan de korrelgrootte.

De korrelgrootte van het poeder is echter niet de enige reden om de druppel diameter niet zo klein mogelijk te maken. Hoe minder druppels er namelijk op een plek gelost worden hoe minder kans op onnauwkeurigheid door uitvloeien. Ook dit is een reden om de druppel diameter niet zó klein te maken dat dit effect zeer sterk optreedt.

Een bijkomend voordeel van het installeren van een nieuwe printkop is dat recenter geproduceerde printkoppen (het momenteel gebruikte model wordt al sinds eind jaren '80 gebruikt) de druppels nauwkeuriger lossen. Dit zal de nauwkeurigheid van het printresultaat ten goede komen. Hierbij moet uiteraard rekening gehouden met de afstand van de printkop tot het printoppervlak. Hoe kleiner deze afstand is, hoe nauwkeuriger de plaatsing.

Het voorgaande in oogschouw nemend moet er dus gezocht worden naar een printkop met een hogere resolutie dan 96 dpi, die een druppeldiameter heeft die kleiner is dan 88 micron. Deze druppeldiameter moet echter niet veel kleiner dan 40-50 micron zijn, de korrelgrootte van het poeder. Aangezien de uitvloeidiameter kleiner zal zijn kan de stapgrootte van de aandrijving verkleind worden waardoor in een hogere resolutie geprint kan worden.

7.2 Methode vervanging

Er zijn twee manieren waarop een nieuwe printkop geïntegreerd kan worden in de huidige machine. De eerste, het kopen van een losse printkop om deze vervolgens met de huidige elektronica te verbinden, klinkt eenvoudig maar kan lastig uitpakken. Om een nieuwe printkop op de huidige elektronica aan te laten sluiten is namelijk specialistische kennis in dit vakgebied nodig. Daarnaast bestaat er een aanzienlijke kans dat deze wijze van aanpassen niet kan worden gerealiseerd binnen de omvang (duur) van deze bachelor opdracht. Niet alleen vanwege het verkrijgen van de vereiste kennis, maar vooral omdat voor de realisatie bepaalde specificaties bekend moeten zijn, die over bijna geen enkele printkop bekend zijn. Hierdoor is de kans zelfs aanzienlijk, dat het nooit zal lukken om de losse printkop met de huidige elektronica te verbinden.

De tweede mogelijkheid om een printkop te integreren is waarschijnlijk eenvoudiger. Bij deze methode wordt niet alleen een losse printkop, maar een printkop (of cartridge) plus de bijbehorende elektronica uit een printer gehaald. Deze kan vervolgens als geheel geïntegreerd worden in de 3D-printer. In dit geval zal wel onderzocht moeten worden hoe deze printkop vanuit de computer aangestuurd wordt, zodat de juiste aanpassingen in het aansturingsprogramma van de Pwdr 0.1 gemaakt kunnen worden.

7.3 Keuze printkop

Nu de gewenste specificaties vastgesteld zijn, en gekeken is op welke wijze een nieuwe printkop overgezet kan worden is het tijd om een keuze te maken. Deze keuze is gevallen op een HP inkjetprinter die werkt met een printkop die voldoet aan de gestelde eisen. De specificaties van deze printer, de HP Deskjet F2480 zijn in de onderstaande tabel gedefinieerd. De druppel- en uitvloeidiameter van de nieuwe printkop is afgeleid uit de resolutie en de stapgrootte die standaard zijn voor een 600 dpi printer. Een druppeldiameter tussen de 40 en 50 micron is vergelijkbaar met de korrelgrootte van het poeder en is naar verwachting nog niet groot genoeg om (inclusief uitvloeidiameter) het poeder te kunnen binden. Om een duidelijk beeld te krijgen van de verschillen tussen de huidige en nieuwe printkop zijn de specificaties van de huidige printkop ook vermeld voor zover deze bekend zijn. Sommige gegevens zijn echter lastig te verifiëren. Zo varieert volgens verschillende bronnen het volume van een druppel van 1,3 pL tot 13,8 pL en is over de uitvloeidiameter weinig te zeggen, gezien het onvoorspelbare karakter van dit verschijnsel.

	Huidig	Nieuw
Maximale resolutie (voor inkjet printer)	96 DPI 38 DPCM	600 DPI (mono) 236 DPCM
Originele stapgrootte	265 µm	43 µm
Druppel diameter	88 µm	40-50 µm
Uitvloeidiameter	165 µm	<i>onbekend</i>
Markt release	Eind jaren '80	jaren '00

7.4 *Ondersteuning nieuwe printkop*

Het implementeren van de nieuwe printkop kan uiteraard niet zomaar. Hiervoor zullen bepaalde onderdelen die deel uitmaken van de huidige hardware en software aangepast moeten worden. Van tevoren zal zo goed mogelijk geprobeerd worden vast te stellen welke van deze onderdelen aangepast moeten worden, en op welke wijze. Aangezien niet alle gegevens over de nieuwe printkop beschikbaar zijn zal het echter lastig zijn om precies te voorspellen welke aanpassingen gedaan moeten worden.

Nu de keuze gevallen is op de printkop die gebruikt wordt in de HP F2480 kan ik ervoor kiezen om alleen de printkop over te zetten (inclusief ribbon cable) en deze te verbinden met de huidige elektronica, of om een deel van de elektronica en/of het positioneringsmechanisme over te zetten. Om deze twee opties te vergelijken doorloop ik de huidige elektronica- en software schema's en kijk ik welke aanpassingen in beide gevallen gedaan moeten worden.

7.4.1 *Alleen printkop overzetten*

Eerst kijk ik naar de optie waarbij alleen de printkop overgezet wordt. De moeilijkheid bij deze optie zit hem erin, dat op dit moment onbekend is hoe de elektronica van de HP F2480 communiceert met de printkop. Als de uitgang van de printkop dus verbonden moet worden met de microcontroller, moet bekend zijn hoe deze aangestuurd kan worden. Naar de aansturing van de huidige printkop was al onderzoek gedaan voordat de Pwdr 0.1 werd gebouwd, waardoor deze wel verbonden kon worden met de microcontroller. Over de aansturing van de printkop van de HP F2480 wordt door HP echter geen informatie verstrekt, en er is ook geen extern onderzoek naar gedaan. Gezien de omvang van een onderzoek naar de aansturing van de huidige printkop is het geen optie om alleen de printkop over te zetten naar de Pwdr 0.1.

7.4.2 *Extra onderdelen overzetten*

De andere optie is die waarbij niet alleen de inkjet cartridge, maar ook ondersteunende onderdelen in de HP F2480 worden overgezet. De onderdelen die in het geval van deze optie overgezet worden zijn:

- De houder van de printkop
- De XY-drager waarover de houder met printkop beweegt
- De aandrijving van de houder met printkop (DC motor en tandriem systeem)
- De microcontroller waarop de pc en stroomtoevoer aangesloten kunnen worden

Het is aannemelijk dat in het geval dat meerdere onderdelen overgezet worden, de bovenstaande onderdelen ook allemaal overgezet worden. Ze staan namelijk allen met elkaar in verbinding in de HP F2480, en zullen om goed te functioneren dus ook in de Pwdr 0.1 met elkaar in verbinding moeten blijven.

Een voordeel van het overzetten van deze onderdelen is dat gebruik kan worden gemaakt van de nauwkeurigheid van de aandrijving in X-richting. Dat zal in dit geval gebeuren met behulp van een DC motor, die niet in stapjes beweegt, maar continue. Door een feedback systeem kan worden gemeten op welke positie de printkop zich bevindt, en zo kunnen zonder te stoppen druppels geplaatst worden. Deze methode levert niet alleen nauwkeurigere plaatsing van druppels op, maar zorgt er ook voor dat in de X-richting sneller geprint kan worden dan met het huidige systeem mogelijk is.

Een ander voordeel is dat bij overzetting van de gehele XY-drager (met houder en printkop) de printkop optimaal over de X-as zal bewegen, zonder dat hierbij constructieve problemen optreden. De mechanische haalbaarheid van de XY-drager is dus gewaarborgd. De aansluiting van de XY-drager op de tandriemen in Y-richting is echter een ander verhaal. Hiervoor zal een solide constructie gebouwd moeten worden, waardoor de nauwkeurigheid van positioneren van de printkop zo min mogelijk beïnvloed wordt.

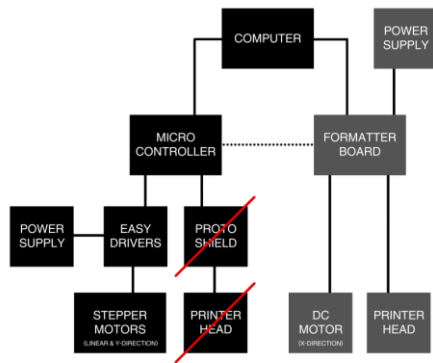
Ook in het geval dat meerdere onderdelen overgezet worden (inclusief de printplaat van de waarop zij aangesloten zijn) is het onbekend hoe de printkop en DC motor aangestuurd kunnen worden. Als echter een manier gevonden kan worden om gebruik te maken van de aansturing vanuit de computer is het mogelijk om indirect commando's te versturen naar de printkop en de DC motor.

Zoals aangegeven is de eerste optie qua tijd niet haalbaar. Aangezien de tweede optie ook nog enkele inhoudelijke voordelen biedt ten opzichte van de eerste krijgt de tweede optie de voorkeur.

7.5 *Elektronica*

Nu gekozen is voor het overzetten van meerdere onderdelen uit de HP F2480 kan er dieper in worden gegaan op de aanpassingen aan de Pwdr 0.1 die hiervoor nodig zijn. Hieronder is een schematische weergave te zien van de elektronica in de nieuwe situatie, waarbij onderdelen van de HP F2480 gebruikt worden.

De grijze blokken in het figuur 10 geven de nieuwe onderdelen in het systeem aan. Aangezien de nieuwe printkop aangestuurd wordt door het formatterboard van de HP F2480, en de SD-kaart aansluiting niet meer gebruikt hoeft te worden (zie volgende paragraaf) heeft het protoshield geen functie meer binnen het systeem. Deze kan dus losgemaakt worden van de microcontroller.

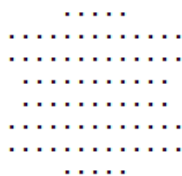


Figuur 10: (vereenvoudigde) weergave nieuwe situatie

7.5.1 Communicatie

In figuur 6 is de verbinding tussen de microcontroller het formatterboard weergegeven met een stippellijn. Dit is gedaan om aan te geven dat de communicatie tussen deze twee onderdelen niet gedefinieerd kan worden. De microcontroller stuurt de stappen motoren voor de Y-richting en de voorraad- en constructiebakken aan. Het formatterboard stuurt de DC-motor voor de X-richting en de printkop aan. Aangezien het formatterboard gedeeltelijk een 'black box' is kunnen de commando's die deze uitvoert niet aangestuurd worden via de microcontroller. De aansturing van het formatterboard, en daarmee de DC-motor en de printkop, zal dus vanuit de computer gebeuren. De interactie tussen de microcontroller en het formatterboard kan daarmee beschreven worden als de volgorde van commando's zoals deze vanuit de computer naar de twee verschillende printplaatjes verstuurd worden.

Om het formatterboard aan te sturen moet de aan te brengen laag bindmiddel gezien worden als een afbeelding die op papier gedrukt wordt. Door de printkop een afbeelding van een te printen laag (uit een tekstverwerker of grafisch programma) te laten 'drukken' kan het bindmiddel op de juiste posities aangebracht worden. Deze afbeelding zal bestaan uit kolommen met een specifiek aantal puntjes, die samen een doorsnede van het te printen object vormen. In figuur 11 is te zien hoe zo'n doorsnede eruit zou kunnen zien.



Figuur 11: doorsnede te printen object

Om de printkop zo aan te kunnen sturen dat hij het bindmiddel op de juiste plekken en in de juiste hoeveelheid aanbrengt moet de werking van de XY-drager in de inktjet printer waar hij uitkomt vergeleken worden met de wijze waarop hij in de 3D-printer functioneert.

Een aantal aspecten van het printen met een 3D-printer is anders dan het standaard printproces zoals dit plaatsvindt in de inkjetprinter. Deze verschillen zijn:

- In de inkjetprinter wordt één druppel per positie gelost, in de 3D-printer moeten meerdere druppels op één positie gelost worden.
- In de inkjetprinter beweegt de ondergrond onder de printkop door, in de 3D-printer beweegt de printkop zelf in x- en Y-richting.

Aangezien de printkop continue over de x-as beweegt is de enige mogelijkheid om meerder druppels bindmiddel op één positie te lossen het herhalen van de gehele printopdracht in X-richting (bij een constante y-positie). Deze (deel)printopdracht zou dan net zo vaak herhaald moeten worden als er druppels per positie nodig zijn.

Nadat de printopdracht bij constante y-positie voltooid is moet de printkop één stapje in Y-richting verschuiven. In de inkjetprinter is dit het moment waarop het papier één stapje verder onder de printkop door schuift. De printopdracht voor een te printen laag moet dus zo gedefinieerd zijn, dat er tijd is om in Y-richting te bewegen zonder dat de printkop doorgaat met het lossen van bindmiddel.

Voordat er een nieuwe laag poeder aangemaakt kan worden moet de printkop naar het midden van de slede bewogen worden. Dit is nodig omdat hij anders tegen de plexiglazen zijwand van de machine aan botst voordat de roller op zijn uiterste positie in Y-richting is. Om de printkop in het midden te zetten kan gebruik gemaakt worden van een actie die de inkjetprinter automatisch uitvoert als de originele printer aan de voorkant geopend werd. Dit openen werd door een sensor geregistreerd om de printkop vervolgens naar het midden van de slede te bewegen, zodat de cartridges vervangen konden worden.

7.5.2 Converteren

Voorafgaand aan het printen moet het CAD-model omgezet worden naar een formaat dat geprint kan worden door de inkjetprinter. De gebruikersinterface van de printer, die in Processing geschreven is, bevat een functie om een STL-file te converteren naar afzonderlijke bestanden, die elk een binaire code voor een te printen laag representeren. In de Pwdr 0.1 werden deze bestanden op de SD-kaart geladen, en vervolgens uitgelezen door de microcontroller. De controller stuurde vervolgens per coördinaat een van te voren gedefinieerd aantal stroomstootjes naar de printkop om zo het benodigde aantal druppels te lossen.

In het geval van het gebruik van een inkjetprinter waarvan de printkop niet direct aangestuurd kan worden is het niet mogelijk om een code 'uit te lezen' en op basis daarvan te printen. Bestanden, zoals in figuur 8, zullen dus in plaats van een code, een letterlijk patroon moeten bevatten dat de printer kan printen. Op basis van de gewenste resolutie moet een afbeelding gegenereerd worden waarin elk te printen coördinaat

gerepresenteerd wordt door een zwarte pixel, met daartussen een bepaald aantal lege pixels. Dit aantal lege pixels is telkens een som van de op de resolutie gebaseerde minimale afstand tussen twee te printen coördinaten. In het geval dat een object bijvoorbeeld met een resolutie van 600 dpi geprint moet worden is deze afstand 0 pixels, aangezien 600 dpi de maximale resolutie van de printkop is. In het geval dat je wilt printen met een resolutie van 300 dpi, dan zal de minimale afstand tussen twee coördinaten 1 pixel zijn.

De huidige functie om te converteren in de gebruikersinterface bevat een tussenfase, waarin een afbeelding, zoals deze hierboven besproken is, gegenereerd wordt. Door de code voor de gebruikersinterface aan te passen kunnen deze afbeeldingen in een mapje opgeslagen worden, zoals dit nu ook gebeurt met de bestanden die voor de SD-kaart bestemd zijn.

Als de afbeeldingen van de doorsnedes echter in hun geheel geprint moeten worden levert dit problemen op, aangezien de gehele XY-drager na elke regel een stap in Y-richting moet bewegen. In theorie moet dit mogelijk zijn, aangezien ook het papier in de inkjetprinter moest verschuiven voor de volgende laag geprint kon worden. In praktijk is het echter lastig om exact te timen wanneer de stap in Y-richting gedaan moet worden. Als de printkop nog met de vorige regel, of al met de volgende regel begint tijdens de stap in Y-richting kan dit onnauwkeurigheid opleveren bij het plaatsen van druppels. Het is dus beter om per regel een afbeelding op te slaan en te printen, en tussen deze printopdracht door het commando voor de stap in Y-richting te versturen. Deze regel is dan wel zo gedefinieerd, dat hij in Y-richting het aantal pixels bevat dat gelijk staat aan de hoeveelheid nozzles die de printkop tegelijk kan lossen (de 'breedte' van de regel dus).

7.5.3 Aanpassingen code

Aangezien een deel van het printproces buiten de gebruikersinterface om gebeurt is het meest praktisch om vanuit de standaard Arduino monitor de printer te bedienen. Hiervoor moet wel een aantal aanpassingen gedaan worden in het bestand `Pwdr_GUI_VO_3`.

Ten eerste moet de code voor het converteren zo aangepast worden dat er afbeeldingen van te printen regels geconverteerd worden en naar een mapje worden gestuurd. Daarbij moet voor de printopdracht 'p' de code zo herschreven worden dat er telkens een nieuwe geconverteerde afbeelding van een regel geprint kan worden, waarna met de stappen motor een stap in de Y-richting gezet wordt. Deze stap in Y-richting is de minimale stapgrootte in X-richting maal de 'breedte' van de regel. Dit komt neer op een stapgrootte van 43 micron maal het aantal nozzles is van de printkop. Aangezien onduidelijk is hoeveel dit er zijn (deze informatie wordt niet vrijgegeven door HP) kan alleen uitgeprobeerd worden bij welke stapgrootte in Y-richting de te printen doorsnede in verhouding is.

De actie 'i' is een nieuwe functie die tot doel heeft de XY-drager zover in Y-richting te bewegen, totdat deze de printkop de vrijheid biedt om van uiterst links naar uiterst rechts te bewegen. Deze stap is nodig om in een goede beginpositie te komen om te gaan printen.

7.5.4 Workflow

De precieze handelingen die uitgevoerd moeten worden om het printproces succesvol te laten verlopen zijn het best te vatten in een *workflow*, een soort handleiding voor het gebruik van de 3D-printer. Hierin zijn alle fasen van het gebruik, waarvan een de meesten al eerder besproken zijn, meegenomen.

1. Verbind het formatterboard via de USB-kabel met de computer en sluit de voeding van het formatterboard aan.
2. Verbind de mirocontroller via de USB-kabel met de computer
3. Open het bestand Pwdr_GUI_VO_3 in Arduino
4. Selecteer via 'Tools > Serial Port' de juiste USB-poort en druk op 'monitor'
5. Druk op de middelste button van de microcontroller om hem te resetten

(Als het goed is wordt nu vermeld dat de connectie gemaakt is en de machine klaar is voor gebruik)

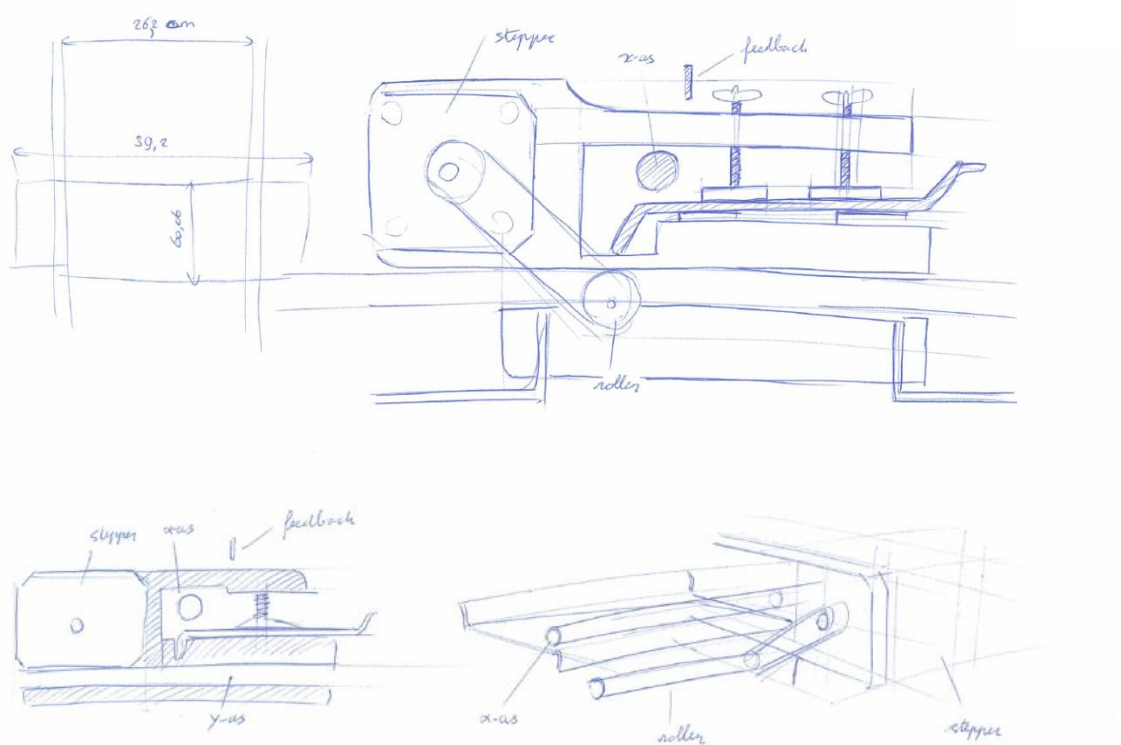
6. Beweeg de XY-drager handmatig naar zijn beginpositie ($y=0$) en zet de printkop in het midden van de slede
7. Controleer of de constructiebak en de voorraadbak schoon zijn, en maak deze indien nodig schoon
8. Sluit de voeding van de printkop en de stappen motoren aan
9. Bepaal de positie van de constructie- en voorraadbak met behulp van de commando's 'z' en 'y' zodat de voorraadbak op zijn laagst, en daarmee de constructiebak op zijn hoogste stand staat.
10. Vul de voorraadbak met poeder, en druk dit poeder stevig aan
11. Vul, indien nodig, de printkop bij met een mengsel van demi-water en ethanol (8:2)
12. Voer de actie 'i' zodat de XY-drager in de positie is waarin de printkop niet meer tegen de plexiglazen wand aan kan botsen.
13. Schakel de sensor van de klep in zodat de printkop naar het midden van de slede beweegt
14. Maak een nieuwe poederlaag aan door de actie 'n' uit te voeren
15. Voer de actie 'i' zodat de XY-drager in de positie is waarin de printkop niet meer tegen de plexiglazen wand aan kan botsen.
16. Schakel de sensor van de klep uit zodat de printkop naar het uiteinde van de slede beweegt
17. Verstuur via 'p' de opdracht om te printen.
18. Herhaal het schema vanaf stap 11

7.7 Fysiek ontwerp

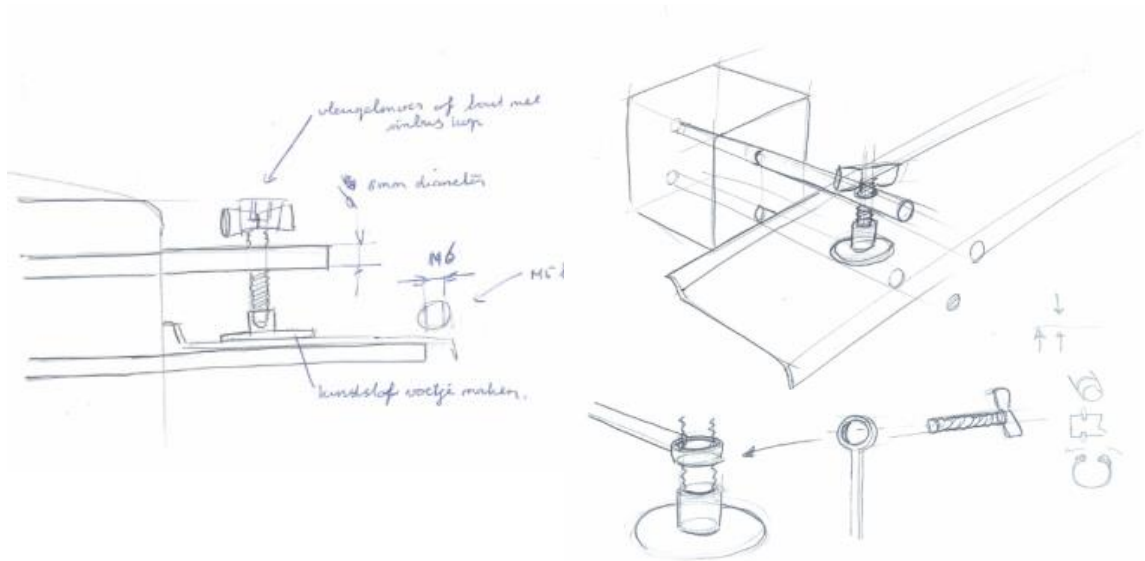
De gekozen aanpassingen vereisen een gedeeltelijke herziening van het fysieke ontwerp van de machine. Om de nieuwe onderdelen te kunnen implementeren in de machine moet de huidige XY-drager vervangen worden. Bij het ontwerpen van een vervangende XY-drager staan de stijfheid en sterkte van het geheel voorop. Ik zal dus goed moeten kijken naar de krachten die op de verschillende onderdelen van de XY-drager werken. Een bijkomende wens is dat het nieuwe ontwerp in de stijl is waarin de gehele machine is gebouwd. Deze wens mag de kwaliteit van de constructie uiteraard niet in de weg staan, maar wordt wel meegenomen in het ontwerp proces.

7.7.1 Ontwerpfase

In de figuur 12 zijn de eerste schetsen te zien voor een plexiglazen constructie ter ondersteuning van de nieuwe printkop. De slede waarover de printkop beweegt is hier al voor de dragers geplaatst, aangezien deze te breed is om ertussen te monteren. In deze fase is het idee ontstaan om de slede met klemmen te bevestigen, zodat deze ook weer te demonteren is.



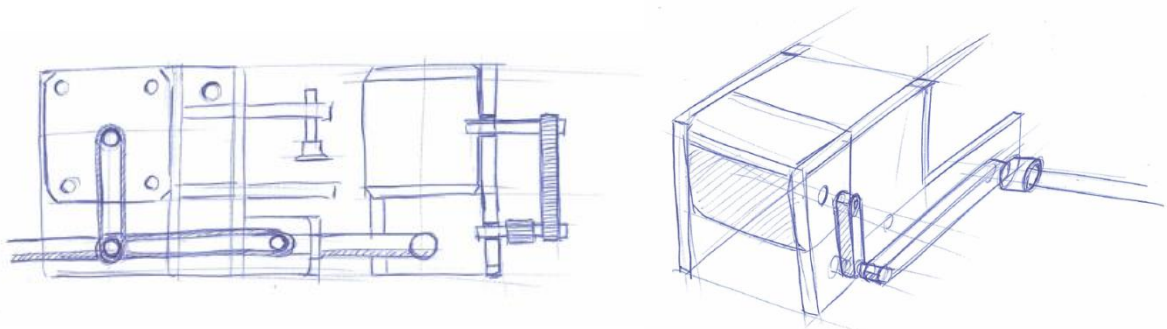
Figuur 12: eerste ontwerpen



Figuur 13: technische uitwerking klem

In figuur 13 zijn voor deze klem een aantal details uitgewerkt. Het idee was om uit de plexiglazen behuizing twee metalen asjes te laten steken. Aan de bovenste van deze asjes kon een klem gemonteerd worden, waarmee de slede tegen het andere asje aan gedrukt wordt. In een later ontwerpstadium zou blijken dat deze klem geen optie is, aangezien de printkop van uiterst links naar uiterst rechts over de slede moet bewegen. In dat geval zou de klem in de weg staan. Een oplossing hiervoor was om de slede met boutjes vast te maken op de onderliggende asjes. Hiervoor moeten wel gaten in de slede geboord worden.

In figuur 14 is te zien dat de roller nog op originele positie ten opzichte van zijn aandrijving is gepositioneerd. Aangezien de slede voor de printkop echter voor de dragers gemonteerd is, moet ook de roller verder naar voren geplaatst worden. Gebeurt dit niet, dan kan de roller niet tot het einde van de constructie bak komen, omdat de gehele XY-drager zich dan al in zijn uiterste positie bevindt. Deze uiterste positie is het punt waarop de XY-drager tegen de wanden van de machine aan botst. In figuur 10 is een aantal schetsen te zien waarin gezocht wordt naar een oplossing voor de aandrijving van de alternatief gepositioneerde roller. Uiteindelijk zal blijken dat tweede as niet nodig is, maar dat de nieuwe (langere) tandriem rechtstreeks, diagonaal onder de slede langs met de roller verbonden kan worden.

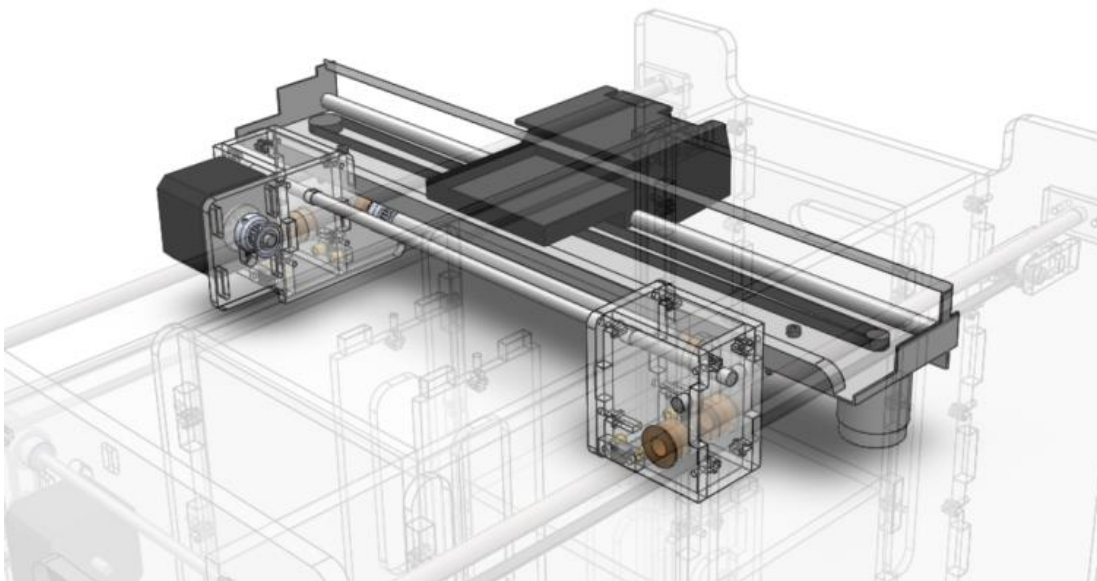


Figuur 14: schetsen van aandrijving roller

De laatste fase van het ontwerptraject heeft plaatsgevonden in SolidWorks. Dit was praktischer dan schetsen, of gedetailleerd uitwerken op papier, aangezien er met veel dimensies gewerkt moest worden. In SolidWorks is meteen te zien of dimensies kloppen, terwijl dit op papier zeer moeilijk te bepalen is.

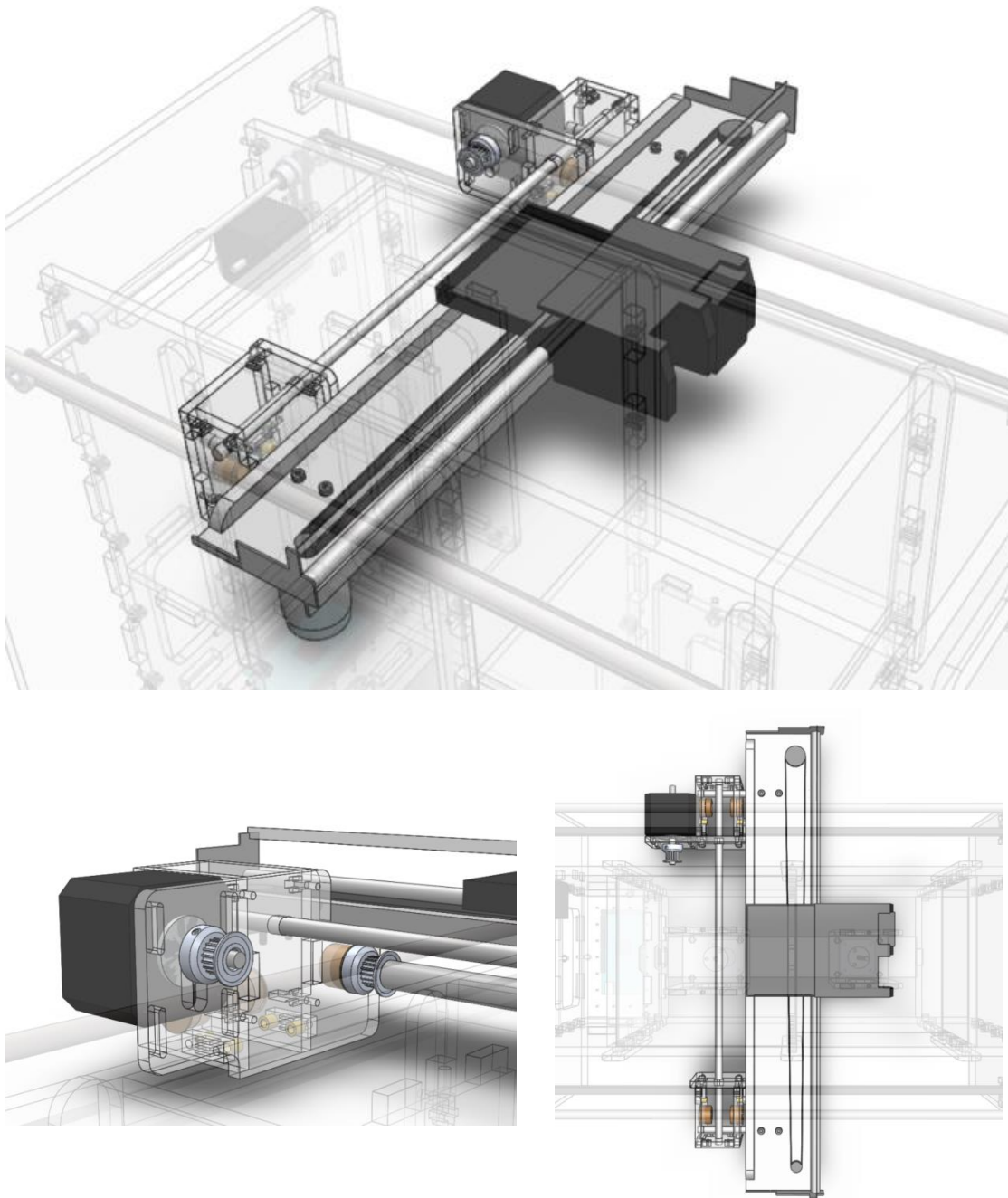
7.7.2 Eindontwerp

In figuur 15 is het eindontwerp van de draagconstructie voor de nieuwe printkop te zien. Aangezien de XY-drager veel breder is dan de printer is echter gekozen om deze *voor* de linker en rechter dragers te plaatsen en niet *ertussen*. Een probleem dat hierdoor optreedt is dat de XY-drager inclusief linker en rechter dragers minder bewegingsvrijheid in Y-richting heeft doordat de gehele draagconstructie breder is dan voorheen. In het geval dat de roller op dezelfde plaats zou blijven zou dit betekenen dat deze niet het gehele oppervlak van de constructiebak kan bestrijken. Daarom moet de roller verder naar voren geplaatst worden. Uiteindelijk heeft dit geleid tot een kleine uitbouw aan de originele linker en rechter dragers, waaraan de roller bevestigd kan worden.



Figuur 15: isometrisch aanzicht van XY-drager

De XY-drager wordt in het nieuwe ontwerp ondersteund door twee metalen assen met een diameter van 6mm. Dit is een eenvoudig realiseerbare en solide methode. Om te zorgen dat de ondersteunende assen horizontaal blijven worden ze door twee gaten (in lijn) in de bijbehorende drager geleid. Om te zorgen dat de assen niet uit de gaten schuiven zullen ze met borgringen vastgezet worden. In eerste instantie was het de bedoeling om de



Figuur 16-17-18: XY-drager isometrisch, aandrijving roller en bovenaanzicht XY-drager

drager met behulp van een klem-constructie vast te zetten, maar aangezien de printkop over de gehele breedte van de drager moet kunnen bewegen bleek dit onmogelijk.

Op de plek waar eerst twee geleidingsassen voor de originele printkop zaten wordt één verbindings as tussen de linker en de rechter drager geplaatst. Samen met de XY-drager en de roller, die beide ook een verbinding vormen tussen de linker en rechter dragers, ontstaat hierdoor een driehoeks constructie, die moet voorkomen dat de dragers ten opzichte van elkaar kunnen bewegen. De as tussen de linker en rechter drager, wordt net

als de assen die de XY-drager ondersteunen door meerder gaten in lijn (in dit geval vier) geleid. De twee gaten aan de binnenkant van de linker en rechter drager zetten de as echter niet vast in horizontale richting, om te voorkomen dat de dragers scheef getrokken worden als de gaten niet exact in lijn zijn. Dit zou namelijk tot gevolg kunnen hebben dat de dragers niet meer soepel over de y-as beweegt.

Tenslotte moet de belangrijke kanttekening gemaakt worden dat voor het doorvoeren van de hiervoor beschreven aanpassingen de assen waarover de XY-drager beweegt verlaagd moeten worden. Dit is noodzakelijk omdat de printkop anders niet dicht genoeg bij de poederlaag komt. In het geval dat de originele versie van de machine al gebouwd is kunnen de assen verlaagd worden door een aantal gaten opnieuw (lager) in het plexiglas te boren. Als de machine nog in zijn geheel gebouwd moet worden kan de lasersnijder deze gaten meteen op de juiste plek uitsnijden, volgens het aangepaste SolidWorks model.

7.7.3 Onderdelen en materialen

Het uiteindelijke ontwerp voor de draagconstructie van de vernieuwde printer bevat een aantal standaard onderdelen, en een aantal (gedeeltelijk) zelf te vervaardigeden onderdelen. De volgende standaard onderdelen dienen besteld te worden

- 1x transparant acrylaat (dikte: 5mm / oppervlakte: 0,05m²)
- 4x koperen lagerbus (diameter: 15,90mm / 8mm)
- 1x stalen as (diameter: 6mm, lengte: 330mm)
- 2x tandriemschijf (verdeling: 2,5 / binnendiameter: 3,2mm)
- 1x tandriem (verdeling: 2,5 / lengte: 200mm)
- Boutjes (m3x12)

Naast deze onderdelen is voor implementatie van de printkop en elektronica een donor printer nodig. Tenslotte is er dus één exemplaar van de HP 2480 nodig om onderdelen aan te ontlenen.



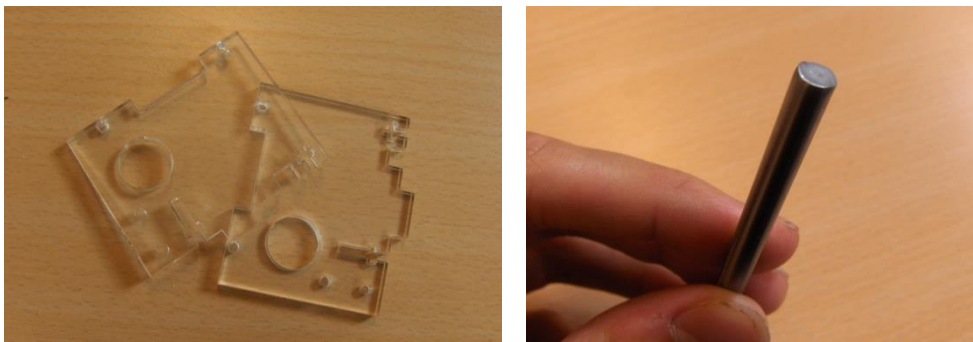
Figuur 19: HP 2480 inkjetprinter

8. Doorvoeren aanpassingen

In het vorige hoofdstuk is beschreven welke aanpassingen aan de machine gedaan zullen worden, en welke benodigdheden hiervoor nodig zijn. In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe de nieuwe printer gebouwd moet worden en hoe een aantal onderdelen vervaardigd dient te worden.

8.1 Voorbereiding

De plexiglazen wanden van de linker en rechter drager vormen de basis van de gehele XY-drager. Ze zijn zo vormgegeven dat ze zelfs zonder bevestiging van boutjes en moertjes in positie blijven, doordat ze gaten en uitstulpingen bevatten die als puzzelstukken in elkaar passen. Daarnaast bevatten ze gaten voor de boutjes en voor de assen die de dragers met elkaar verbinden. Dit betekent dat het van belang is dat de plaatjes met precisie vervaardigd worden, omdat ze anders bij de constructie met elkaar en met de assen gaan knellen. De makkelijkste manier om deze precisie te behalen is door de plexiglazen plaatjes met een lasersnijder uit te snijden, waarbij niet het brandpunt van de laserstraal, maar de omtrek raakt aan de contouren van de te uit te snijden DXF bestanden.

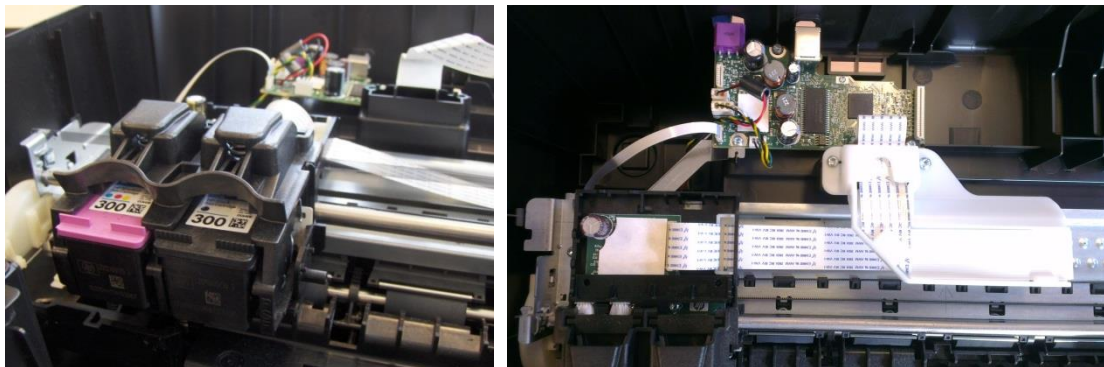


Figuur 20-21: plexiglazen wandjes en metalen as

De assen ter ondersteuning van de geleider van de printkop en de as die de dragers met elkaar verbindt kunnen met behulp van een ijzerzaagje of een lintzaag op lengte worden gemaakt. Precisie is hierbij geboden, aangezien de benodigde lengtes precies uit een as van 0,5m gehaald kunnen worden. In elk van de ondersteunende assen moeten, nadat ze op lengte gezaagd zijn, twee gaten geboord worden van 3mm doorsnede. Op de plekken waar de assen het plexiglas kruisen moeten met behulp van een draaibank rondom smalle gleufjes gemaakt worden, om ze zo later met borgringetjes vast te kunnen zetten.

Aangezien de tandriemschijf, die dezelfde tandverdeling heeft als de aan te schaffen tandriem, een binnendiameter van 3,2mm heeft moet deze uitgeboord worden tot 5mm. Alleen dan kan de tandriemschijf bevestigd worden aan de aandrijfas van de stappen motor.

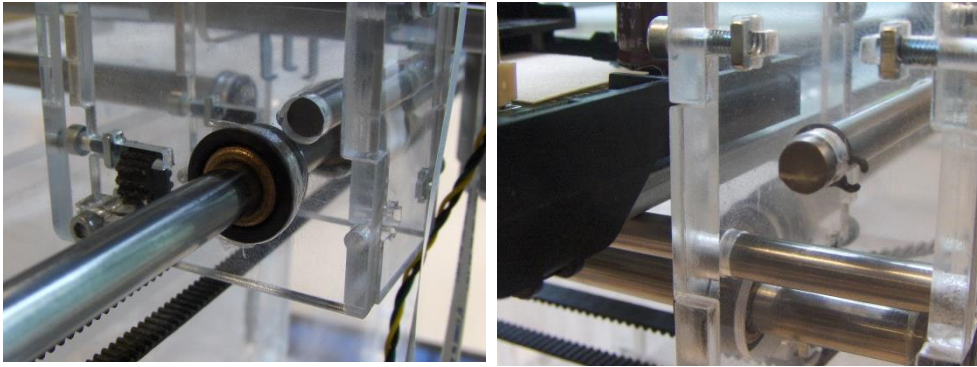
Om de juiste onderdelen van de HP F2480 te kunnen gebruiken moeten deze eerst ontleed worden uit de inkjetprinter. De meeste onderdelen, inclusief de printkop, de geleider en de printplaatjes, kunnen met behulp van een torx-schroevendraaier worden ontkoppeld. Alleen de papierladesensor is niet te ontkoppelen zonder een deel van de kunststof behuizing te forceren. Na ont koppeling van de geleider moeten hierin vier gaatjes geboord worden van 3mm doorsnede, om ze te kunnen verbinden met de draagassen.



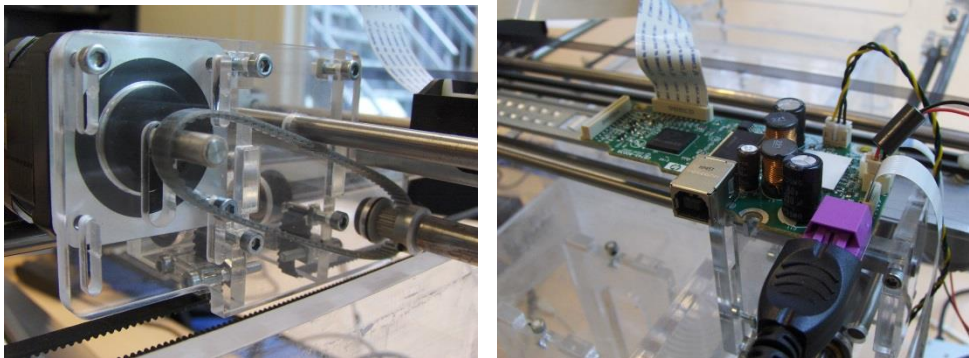
Figuur 22: het binnenwerk van de HP 2480

8.2 Constructie

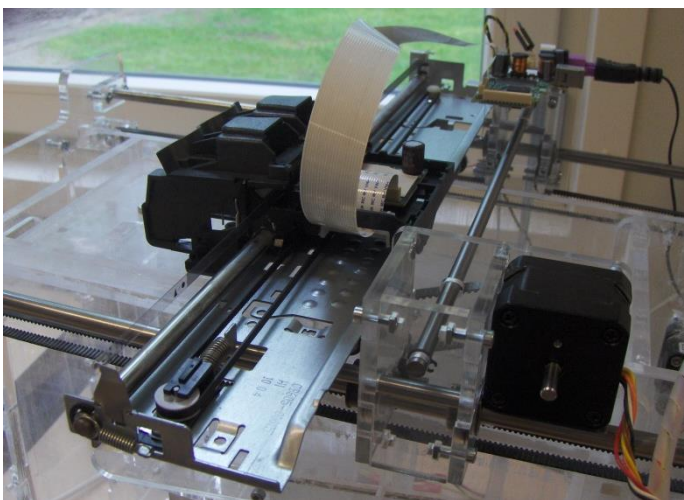
De plexiglasen wandjes vormen de basis van de XY-drager, die de slede voor de printkop ondersteunt. Nadat deze met behulp van boutjes aan elkaar bevestigd zijn kunnen de lagers in het plexiglas bevestigd worden (zie figuur 23). Aangezien de lagers de XY-drager over de y-assen moeten geleiden moeten deze stevig verankerd zijn. Bij gaten die teveel speling bieden kan daarom om de lagers, alvorens de ze te bevestigen, plakband gedaan worden zodat ze strakker aansluiten op het plexiglas. Als de linker en rechter drager om de y-assen geschoven zijn, en de tandriemen in Y-richting vastgemaakt zijn aan de dragers kunnen ze met elkaar verbonden worden door de 6mm as. Aan de binnenkant van de uiterste wanden waar deze as doorheen gaat moeten borgringetjes bevestigd worden, zodat de as niet in X-richting kan bewegen (zie figuur 24). Voordat de y-assen weer bevestigd kunnen worden moet de roller tussen de twee dragers in geplaatst worden, waarbij de tandriem om hem mee aan te drijven niet vergeten moet worden (zie figuur 25). Vervolgens kan de tandriem gespannen worden door de stappenmotor omhoog te bewegen en de boutjes aan te draaien. Nadat ook de korte 6mm asjes in de daarvoor bestemde gaten bevestigd zijn kan de slede er met boutjes aan bevestigd worden. Tenslotte kan het formatterboard, van waaruit alle elektronische onderdelen uit de inkjetprinter aangestuurd worden, met een stukje tape op de linker of rechter drager geplakt worden (zie figuur 26). Deze positie biedt precies genoeg speling voor de bedrading, en door het printplaatje op zo te bevestigen kan deze makkelijk vervangen worden, en kunnen de linker en rechter drager (op één wandje na) identiek blijven.



Figuur 23-24: geleider voor y-as (links) en as met borgring (rechts)



Figuur 25-26: bevestiging tandriem (links) en formatterboard op drager (rechts)



Figuur 27: de gehele XY-drager

9. Conclusie

Het verbeteren van de nauwkeurigheid waarmee de open-source 3D-printer Pwdr 0.1 print was het doel van deze opdracht. De opdracht is gedeeltelijk volbracht, aangezien tot in detail een geheel onderbouwd voorstel is gedaan voor deze verbetering. Deze verbetering houdt in dat met behulp van onderdelen van de inkjetprinter HP F2480 op hogere resolutie, en met minder onnauwkeurigheid geprint kan worden. De aansturing loopt hierbij deels via de microcontroller, die de stappenmotoren aandrijft, en deels via het formatterboard van de HP F2480, die een DC motor en de printkop aanstuurt. Ter ondersteuning van de nieuwe printkop en overige onderdelen uit de inkjetprinter is een plexiglazen constructie ontworpen en gebouwd. Deze maakt het tevens mogelijk dat de roller voor het poeder zijn volledige bereik behoudt bij het gebruik van de nieuwe printkop.

Uiteindelijk is het door incidenten en tijdsgebrek niet gelukt om een werkend prototype te maken van het beschreven ontwerp. Wel is een model gebouwd dat veel lijkt op het eindontwerp, en waarvan de bouw ertoe bijgedragen heeft dat het eindontwerp op papier in zijn huidige vorm bestaat. Dat er geen werkend prototype gemaakt is betekent ook dat de machine niet getest is en dus niet bewezen is dat het eindontwerp de nauwkeurigheid waarmee de Pwdr 0.1 print verbetert.

10. Verantwoording en achtergrond

Een aantal zaken die tijdens dit project plaatsvonden dienen toegelicht te worden in het belang van het begrip van het eindresultaat. Het betreft ongelukjes, dingen die over het hoofd zijn gezien en beslissingen die achteraf gezien misschien anders uit hadden moeten vallen. Het bespreken van dit alles geeft eventuele lezers van dit verslag een beeld van de moeilijkheden die tijdens een opdracht als deze kunnen optreden, en vormen een les voor volgende projecten.

10.1 *Breedte van onderzoek*

Het doel van dit project was het verbeteren van de nauwkeurigheid waarmee de open-source 3D printer Pwdr 0.1 print. Om dit te bereiken is eerst gekeken naar de machine als geheel. Deze fase nam een aanzienlijk deel van de tijd in beslag die voor de opdracht gesteld werd. Gaandeweg bleek dat uit het afstudeerverslag van de 3D-printer al op te maken was dat de onnauwkeurigheid van de printer sowieso gezocht moest worden in het type printkop, aangezien deze met minimale resolutie printte. Uit metingen in het verslag viel af te leiden dat de machine statisch en dynamisch al goed was bepaald en op scheikundig vlak stonden eigenschappen van het printproces al vast (korrelgrootte, type poeder), of een onderzoek ernaar viel niet te bewerkstelligen binnen de gestelde tijd voor de opdracht (invloed kracht op poeder bij vormen laag, invloed draaisnelheid roller op poeder). Daarbij stond laatstgenoemd onderzoek zover af van het vakgebied van industrieel ontwerpen dat het niet realistisch zou zijn om hier een onderzoek aan te wijden.

Toen voor mij eenmaal duidelijk was dat de focus op de verbetering van de printkop moest liggen was dus al een significant deel van de tijd voor de opdracht verlopen. De vraag is of het nuttig was het onderzoek zo breed te beginnen. Bij een bezoekje rond die tijd aan een docent die de opdracht in eerste instantie voorgelegd had, werd de indruk gewekt dat deze er bij voorbaat al vanuit ging dat het de printkop was die de nauwkeurigheid negatief beïnvloedde, en dat vervanging ervan dus sowieso het doel van de opdracht was. Daarbij was er zelfs een voorstel voor een printkop gedaan, in de vorm van een aangeleverde paper over de werking van de betreffende printkop. Toen de paper voor het eerst gedeeld werd zei deze mij echter vrij weinig, aangezien ik nog niet genoeg thuis was in het vakgebied van 3D-printen.

Nadat er genoeg onderzoek was gedaan naar de eigenschappen van het poeder en het bindmiddel viel de keuze voor een printkop op een model dat geïntegreerd was in een inkjetprinter. Na aanschaf van deze inkjetprinter begon door te dringen dat het aansturen van een gedeeltelijke black box het printproces zo omslachtig maakt dat het nooit een verbetering aan de 3D-printer zou worden die als serieuze opvolger gezien kon worden van het eerste model. Pas toen het experimenteren met de elektronica uit de inkjetprinter

vergevorderd was werd duidelijk waarom de paper over de direct aanstuurbare printkop al vanaf het begin in beeld was.

Het was misschien logischer geweest om dit project als een project met sterk elektrotechnisch karakter te presenteren, en de gesuggereerde printkop als startpunt te zien voor de opdracht. Afgezien van een moeilijk te bepalen factor (de invloed van de druppelgrootte op het printresultaat) lijkt deze aangeleverde printkop namelijk een gegarandeerde verbetering, aangezien hij nieuwer dan de tot dan toe gebruikte is, op hogere resolutie print, en eveneens direct aan te sturen is. Daarnaast zou de implementatie van een direct aan te sturen printkop een verbetering zijn die ook door mensen die de Pwdr 0.1 nagebouwd hebben doorgevoerd kan worden.

10.2 *Werkvolgorde*

Doordat al in het begin van de het project een elektronisch defect in de Pwdr 0.1 opgemerkt werd, maar de oorzaak niet gevonden kon worden was het niet mogelijk om te werken met de machine alvorens dieper in te gaan op de eventuele gebreken van de 3D-printer. Dit zorgde voor misverstanden over de werking van de machine, en het zou in de toekomst dan ook verstandig zijn om bij de verbetering van een gebruiksvoorwerp het eerst in praktijk te gebruiken.

10.3 *Incidenten*

Bij het experimenteren met de elektronica uit de inkjetprinter ontstond op een ongelukkig moment kortsluiting. De testopstelling voor de printkop was net klaar, toen bij het aansluiten van de voeding van het formatterboard kortsluiting ontstond. Gevolg was dat én de elektronica, én de laptop waarop deze aangesloten was kapot waren. Dit leverde enige vertraging binnen de opdracht op. Vervolgens werd verder gewerkt met een leenlaptop. Dit werken met een leenlaptop, of in ieder geval een veiligheidssysteem (kastje tussen laptop en elektronica) had eigenlijk vanaf het begin moeten gebeuren aangezien bij het experimenteren met elektronica altijd kans is op soortgelijke incidenten.

Na aanschaf van een vervangende inkjetprinter bleek dat van deze printer de sensor voor de papierlade niet werkte. Aangezien de tijd drong en de papierladesensor van de eerst aangeschafte inkjetprinter nog in tact moest zijn (was niet aangesloten tijdens kortsluiting) leek alsof dit met wat improvisatie te compenseren viel. In de uiteindelijke test opstelling bleek echter dat de sensor nog steeds niet wilde werken, waardoor het niet mogelijk was om te testen of de printkop in het midden van de slede gestopt kon worden. Hierdoor was het ook niet mogelijk om een geheel werkend prototype te maken, aangezien het aanmaken van een nieuwe laag niet volbracht kon worden.

10.4 *Onoplettendheid*

Het bouwen van de nieuwe onderdelen leverde zo nu en dan vertraging op door onoplettendheid van mijn zijde. Bij het snijden van het plexiglas bleken fouten in het

SolidWorks model te zitten, en bij het opnieuw snijden bleek na aanpassing van het CAD-model weer een andere fout over het hoofd te zijn gezien. Dit had ook te maken met de tijdelijke afwezigheid van mijn de documenten op de gecrashte laptop, maar dit mag geen excuus zijn voor deze slordige fouten. Het is dan ook zaak om bij het vervaardigen van onderdelen in de werkplaats altijd dubbel te checken of alle maten kloppen, aangezien dit een hoop tijdsbesparing op kan leveren.

Door een andere onoplettendheid had al in een vroeger stadium ontdekt kunnen worden dat het onmogelijk was om de nieuwe elektronica te implementeren zonder de hele machine aan te moeten passen. Een kleine onnauwkeurigheid in het nabouwen van de nieuwe printkop in SolidWorks zorgde er namelijk voor dat het leek alsof deze de assen in Y-richting niet raakte, terwijl dit in praktijk wel het geval bleek te zijn. Naast een aanpassing in de reeds vervaardigde plexiglazen onderdelen hadden hiervoor dus ook aanpassingen aan de rest van de machine gedaan moeten worden. Het zou is dus belangrijk om er zeker van te zijn dat uit de werkelijkheid nagebouwde onderdelen in het CAD-model echt kloppen om dit soort problemen voortijdig te ontdekken.

Een laatste probleem dat pas laat ontdekt werd, is dat de nieuwe printkop altijd van uiterst links naar uiterst rechts over de slede beweegt. Dit betekent dat het ten eerst niet mogelijk is om de slede met klemmen vast te zetten, en ten tweede dat de printkop niet zomaar in het midden stilgezet kan worden bij het aanmaken van een nieuwe laag poeder. Hoewel dit een vrij voordehand liggend probleem is werd het, ook na controle van het CAD-model, pas laat opgemerkt. Overigens zou het stilzetten van de printkop in het midden van de slede vermeden kunnen worden wanneer de machine zo gebouwd wordt dat de plexiglazen wanden geen uitstulpingen boven de aansluitpunten van de assen in Y-richting bevatten. Voor deze aanpassing in het CAD-model was echter geen tijd meer, en het zou lastig zijn dit te bewerkstelligen, aangezien er dan amper een millimeter ruimte voor materiaal overblijft boven het aansluitpunt van de y-as. Dit zou het barsten van het plexiglas tot gevolg kunnen hebben, waardoor de as in Y-richting loskomt en de machine niet meer te gebruiken is. Het verlengen van de gehele machine kan ook een optie zijn.

10.5 *Begeleiding*

De begeleiding tijdens de opdracht was zeer betrokken. Op momenten dat de motivatie laag was, was dit een reden om toch door te zetten en verder te gaan met de opdracht. Dat deze motivatie laag was lag soms aan de eerder genoemde voorvallen en soms aan het feit dat deze opdracht het enige lopende project was, en het daarom soms wat teveel van het goede werd. Het enig nadeel van de begeleiding ontstond doordat het met een aanzienlijk deel van de opdracht voor de boeg alleen nog mogelijk was om 's avonds af te spreken. Dit was vooral onpraktisch bij kleine probleempjes met de werking van de machine. Daarnaast is het lastig om op één avond in de week de voortgang te bespreken zonder daarbij details te vergeten. De begeleiding via e-mail was ook in orde, maar in veel gevallen is het makkelijker om problemen onder vier ogen te bespreken.

Nawoord

Ik zit in een lege afstudeerkamer als ik het laatste hoofdstuk van dit verslag schrijf. Een metafoor voor de niet behaalde doelen? Zo erg zou ik het niet willen maken. Ik zie tekenen van leven om mij heen: een volle kapstok, een aangebroken pak hagelslag, een openstaande laptop en een dienblad met gebruikte koffiemokken. Er zijn dus dingen gebeurd, en er gaan nog dingen gebeuren.

Met de kamergenoten die nu afwezig zijn heb ik me gedurende dit project kostelijk vermaakt. We hebben eten gedeeld, koffie voor elkaar gezet en gekletst over *het leven*. Dit alles kan niet in harde cijfers uitgedrukt worden, maar het was een ervaring die mijn leven verrijkt heeft. En zo is het misschien ook wel met de Bachelor Opdracht. Het traject was lang, soms inspirerend, soms moeizaam, maar bovenal leerzaam. Ik heb me mogen verdiepen in verschillende vakgebieden als elektronica, computersoftware en materiaalkunde en heb, mede dankzij de betrokken begeleiding, veel geleerd over de 'wonderenwereld van het 3D-printen' en het 'magische apparaat' waaraan ik mij gewijd heb. Om mij heen zijn tussen de hagelslag en de koffiemokken dan ook vele tekenen van leven van mijn opdracht te vinden: een bijna voltooid prototype, een gedemonteerde printkop, een testopstelling en een afstudeerverslag. Ze komen samen in dit verslag en krijgen zo allemaal een plekje in het proces.

Ondertussen hebben mijn kamergenoten hun plekje ook weer ingenomen, wat mij brengt bij een laatste bevinding. Het individuele werken is misschien nog wel het moeilijkste, en uiteindelijk het meest leerzame aspect van de Bachelor Opdracht. Hoe langer het proces, hoe heviger het gevecht tegen jezelf wordt. Tussen discipline, interesse en motivatie bevinden zich vele grijstinten die het soms onmogelijk maken zo lang met eenzelfde project bezig te zijn. Dat het uiteindelijk gelukt is om zover te komen dank ik naast een beetje doorzettingsvermogen dan ook voor een groot deel aan mijn betrokken kamergenoten en, daar is hij nog een keer om de laatste woorden van dit verslag te vormen: mijn begeleider Alex.

